

东北大学研究生教材建设立项资助项目
辽宁省百千万人才工程培养经费资助

层状金属复合材料制备 理论与技术

祖国胤 主编
姚广春 主审

Theories and Technologies of
Preparation Layered Metal Composite



东北大学出版社
Northeastern University Press

东北大学研究生教材建设立项资助项目
辽宁省百千万人才工程培养经费资助

层状金属复合材料制备理论与技术

祖国胤 主编
姚广春 主审

东北大学出版社
· 沈 阳 ·

© 祖国胤 2013

图书在版编目 (CIP) 数据

层状金属复合材料制备理论与技术/祖国胤主编. —沈阳: 东北大学出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-5517-0523-3

I. ①层… II. ①祖… III. ①金属复合材料—材料制备—研究 IV. ①TB331

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 300732 号

内 容 提 要

本书全面、系统地归纳总结了层状金属复合材料的主要生产工艺及技术发展趋势, 介绍了材料的性能测试及质量评价方法。对层状金属复合材料固相结合机制的研究进展进行了综合评述, 指出了该领域理论的主要科学问题及热点研究方向。

本书结合钛-钢爆炸复合板界面组织及力学性能、电化学性能的研究实践, 介绍了爆炸复合的工艺特点及 TEM、XRD 等现代分析测试技术在复合材料研究中的应用。以铜-铝层状金属复合材料为例, 介绍了层状金属复合材料界面金属间化合物的生长机制及控制方法, 并从理论上给出了科学的解释。

不锈钢-碳钢等变形抗力高, 易氧化的双金属复合一直是层状金属复合材料研究领域的难点, 本书在这一领域的研究取得了良好进展, 首次提出了瞬间液相轧制复合技术及高频电流在线加热技术, 实现了低压力、小变形条件下不锈钢-碳钢的良好复合。

泡沫铝夹心结构材料及散热器用复合钎焊铝箔是在汽车制造领域具有重大应用潜力的两种层状复合结构新材料。结合这两种材料的技术研发及工程化实践, 本书系统地介绍与阐释了材料制备过程中涉及的界面液固相反应机理、组分分层精度控制及界面相结构设计等该领域重要的科学问题。

在本书的最后, 笔者特别精心编写了层状金属复合材料领域使用频率较高的科技词汇的英、汉对照表。

本书可供材料加工工程、材料学、冶金工程等专业的研究生使用, 也可作为材料冶金类本科生及从事层状金属复合材料研究的科技人员的参考书。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路3号巷11号

邮编: 110819

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场室) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http://www.neupress.com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 20.5

字 数: 512千字

出版时间: 2013年12月第1版

印刷时间: 2013年12月第1次印刷

责任编辑: 向阳 刘乃义

封面设计: 刘江旻

责任出版: 唐敏志

责任校对: 文浩

ISBN 978-7-5517-0523-3

定 价: 48.00元

前 言

金属基复合材料是当前材料科学领域的研究热点。国内外的科研人员经过几十年的努力，已成功开发出多种复合材料的制备技术，并基本建立了相关的理论体系，形成了一门新兴的材料学科。层状金属复合材料是金属基复合材料的重要分支，并以其制备工艺成熟、适合连续化工业生产、产品规格齐全、制品性能好等特点成为金属基复合材料重要的发展方向。

东北大学材料加工工程专业及其作为其前身的金属压力加工专业，多年来一直致力于从事层状金属复合材料制备技术及其理论的研究。通过 30 余年的研究工作，取得了一系列重要的研究成果，在固相轧制复合、液/固相复合、半固态铸轧复合等领域形成了一定的研究特色，研究水平在国内居于领先地位。东北大学层状金属复合材料研究团队先后承担了 20 余项国家科技攻关计划、国家“863”高技术研究发展计划、国家自然科学基金、辽宁省科技攻关计划等课题，研究工作具有较强的前沿性、系统性与连续性。另外，课题组还承担了多项企业技术开发课题，获得了汽车散热器用复合钎焊铝箔生产工艺、铝芯复合铜排制备技术、泡沫铝夹心板应用制品等一系列专利成果，创造了显著的经济效益和良好的社会效益。

东北大学为硕士研究生开设“多层金属复合理论与技术”这门专业课已有近 30 年的时间，培养了近百名专门从事层状金属复合材料技术开发与理论研究的专业技术人员。为了适应当前研究生培养计划对提升人才创新能力，突出教材的实用性、应用性等要求，笔者根据近年来的教学实践，参考本课程以往授课教师宝贵的讲义内容，收集补充了最新的研究资料，重点结合课题组多年来在层状金属复合材料领域的研究成果及技术研发实践，编写了这本力求达到专业性强、内容新颖、全面、深入、高水平等目标的研究生教材。

参加本书编写的人员有：祖国胤（第 1、2、3、4、7、8、9 章，第 5 章 5.3 至 5.6 节，第 6 章 6.1 节至 6.5 节）；王虎年（第 5 章 5.1 及 5.2 节）；李小兵（第 6 章 6.6 节至 6.11 节）。全书由祖国胤统稿。

在本书的出版过程中，得到了东北大学研究生院的大力支持与帮助。东北大学姚广春教授审阅了全部书稿内容，提出了宝贵的意见。张志刚博士，硕士研究生刘佳、宋洪全、杜鹏等参与了部分书稿资料的整理工作，在此一并表示真诚的感谢。由于作者水平有限，书中疏漏及不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2013 年 10 月

目 录

1 层状金属复合材料概论	1
1.1 复合材料	1
1.1.1 复合材料的定义	1
1.1.2 复合材料的分类	1
1.1.3 金属基复合材料的分类	2
1.2 金属基复合材料的性能特点及应用	6
1.2.1 金属基复合材料的性能	6
1.2.2 金属基复合材料的应用	7
1.3 层状金属复合材料的研究进展	9
1.4 层状金属复合材料的发展趋势与展望	11
1.4.1 存在的主要问题	11
1.4.2 层状金属复合材料发展趋势展望	12
参考文献	12
2 层状金属复合材料固相复合理论及研究进展	15
2.1 层状金属复合材料固相复合机制	15
2.1.1 机械啮合理论	15
2.1.2 金属键理论	15
2.1.3 能量理论	16
2.1.4 薄膜理论	16
2.1.5 位错理论	16
2.1.6 扩散理论	16
2.1.7 再结晶理论	16
2.1.8 三阶段理论	17
2.1.9 Bay N 理论	17
2.2 层状金属复合材料界面结合机制的研究进展	18
参考文献	22
3 层状金属复合材料的性能测试及质量检测	25
3.1 层状金属复合材料的抗拉强度	25
3.2 层状金属复合材料的弯曲强度	26
3.3 层状金属复合材料界面强度的测定	27

3.4 层状金属复合材料的断裂韧性	29
3.5 层状金属复合材料的冲击性能	30
3.6 层状金属复合材料的无损检测方法	33
参考文献	36

4 层状金属复合材料的主要制备技术

37

4.1 固-固相复合技术	37
4.1.1 爆炸复合法	37
4.1.2 爆炸-轧制复合法	39
4.1.3 轧制复合法	40
4.1.4 扩散复合法	42
4.1.5 旋压复合法	42
4.1.6 PIT 轧制复合法	43
4.2 液-固相复合工艺	44
4.2.1 铸造复合法	44
4.2.2 反向凝固法	44
4.2.3 喷射沉积法	45
4.2.4 堆焊复合法	45
4.2.5 钎焊-热轧复合法	45
4.2.6 半固态铸轧复合法	46
4.3 液-液相复合技术	47
4.4 层状金属复合材料制备新技术	48
4.4.1 累积叠轧复合技术	48
4.4.2 SHS 技术	49
4.4.3 PPR 技术	51
4.4.4 喷射轧制技术	51
4.4.5 电磁控制连铸技术	52
4.4.6 激光熔覆技术	52
4.4.7 超声焊接技术	53
参考文献	53

5 爆炸复合工艺与理论

55

5.1 爆炸复合基本理论概述	55
5.1.1 爆炸复合过程	55
5.1.2 爆炸复合时覆板的运动规律	56
5.1.3 射流形成理论	59
5.1.4 波的形成机理	61
5.1.5 爆炸复合的可行性窗口	63
5.2 爆炸复合技术的特点、应用和展望	63

5.2.1	爆炸复合技术的特点	63
5.2.2	爆炸复合技术的工程应用	64
5.2.3	爆炸复合技术的展望	65
5.3	铜-钛爆炸复合板的研究实践	66
5.3.1	研究内容及总体研究方案	66
5.3.2	实验材料与样品制备	67
5.3.3	热处理工艺的确定	69
5.4	爆炸复合界面组织及成分分析	71
5.4.1	爆炸复合结合区金属的塑性变形	71
5.4.2	爆炸复合结合区中金属的熔化	74
5.4.3	爆炸复合结合区元素的扩散	75
5.4.4	热处理对复合界面组织的影响	76
5.5	铜-钛爆炸复合板性能研究	80
5.5.1	电化学性能研究	80
5.5.2	力学性能研究	84
5.6	研究成果总结	88
	参考文献	88

6 铜/铝双金属复合材料的研究

92

6.1	层状金属复合材料界面金属间化合物生长行为的研究进展	92
6.2	轧制复合中铜/铝复合板带结合强度的影响因素	96
6.2.1	表面处理对结合强度的影响	97
6.2.2	一次轧制中影响结合强度的因素	98
6.2.3	二次轧制中影响结合强度的因素	100
6.3	铜/铝轧制复合板退火工艺的研究	102
6.3.1	退火实验方法	102
6.3.2	低温退火的测试结果及分析	102
6.3.3	高温短时退火的测试结果及分析	103
6.3.4	轧制复合板热处理机理探讨	104
6.4	铜表面镀金属轧制复合研究	107
6.4.1	轧制复合实验结果	107
6.4.2	铜表面镀 Ag 轧制铜/铝复合板实验研究	107
6.4.3	铜表面镀 Zn 轧制铜/铝复合板实验研究	108
6.5	铜铝轧制复合机理的研究	110
6.5.1	复合界面微观组织	110
6.5.2	复合界面经剥离后的微观组织	112
6.6	异步轧制的发展及在复合材料制备中的应用	117
6.6.1	异步轧制技术的发展现状	117
6.6.2	异步轧制的技术特点	118

6.6.3	异步轧制复合的变形区分析	119
6.6.4	异步轧制复合的界面区应力分析	121
6.6.5	异步轧制对复合界面状态的影响	123
6.7	异步轧制中轧辊速比对复合界面组织与性能的影响	123
6.7.1	界面组织形貌分析	124
6.7.2	界面物相分析	125
6.7.3	界面区显微硬度分析	128
6.7.4	异步速比对复合板基体厚度比的影响	129
6.7.5	异步速比对复合板拉伸性能的影响	130
6.8	异步轧制压下率对复合界面组织的影响	131
6.8.1	界面组织形貌分析	131
6.8.2	异步速比对轧制复合临界压下率的影响	134
6.9	退火温度对异步轧制复合界面组织与性能的影响	134
6.9.1	界面组织形貌分析	135
6.9.2	界面物相分析	135
6.9.3	界面区显微硬度分析	138
6.9.4	退火温度对复合板拉伸性能的影响	139
6.10	退火时间对复合界面组织的影响	140
6.11	界面金属间化合物的生长机制与控制方法	141
6.11.1	铜/铝界面金属间化合物的生长机制	141
6.11.2	界面金属间化合物的控制方法	144
	参考文献	145

7 不锈钢-碳钢复合板制备技术与理论

150

7.1	研究背景	150
7.1.1	不锈钢-碳钢复合板的主要生产工艺	150
7.1.2	不锈钢-碳钢复合板的发展历史	156
7.1.3	我国不锈钢-碳钢复合板的市场现状	157
7.2	不锈钢/碳钢的冷轧及热轧复合研究	159
7.2.1	不锈钢-碳钢复合板冷轧复合工艺的研究	160
7.2.2	不锈钢-碳钢复合板热轧复合工艺的研究	162
7.2.3	研究小结	168
7.3	钎焊-轧制复合的实验研究	169
7.3.1	热模拟实验	169
7.3.2	实验结果与分析	171
7.3.3	钎焊不锈钢-碳钢复合板轧制工艺实验	180
7.3.4	实验结果与分析	183
7.3.5	研究小结	187
7.4	瞬间液相轧制复合的实验研究	189

7.4.1	瞬间液相扩散连接技术	189
7.4.2	实验方法	190
7.4.3	实验结果与分析	192
7.4.4	瞬间液相轧制复合工艺结合过程模型	199
7.4.5	研究小结	201
7.5	高频电流在线加热复合轧制技术	202
7.5.1	高频电流在线加热技术	202
7.5.2	高频电流的集肤效应和邻近效应	203
7.5.3	高频电流在线加热复合轧制装置	205
7.5.4	高频电流在线加热复合轧制实验	208
7.5.5	实验结果及分析	208
7.5.6	研究小结	212
7.6	高频电流在线加热过程温度场模拟	213
7.6.1	高频电流在线加热过程的数学描述	213
7.6.2	差分方程	220
7.6.3	传热模型的求解	222
7.6.4	接触热阻的模拟	222
7.6.5	温度场数值模拟结果及分析	224
7.6.6	研究小结	229
7.7	研究成果总结	230
	参考文献	232

8 泡沫铝夹心板的制备及力学性能	238
-------------------------	------------

8.1	泡沫铝夹心板材料简介	238
8.2	泡沫铝夹心板的结构特点	239
8.2.1	泡沫芯体夹心板的类型及发展	239
8.2.2	泡沫铝夹心板的力学特性	240
8.3	泡沫铝夹心板的应用	240
8.3.1	在轨道交通领域的应用	240
8.3.2	在航空航天领域的应用	241
8.3.3	在建筑领域的应用	242
8.4	泡沫铝夹心板的制备技术	242
8.4.1	物理连接方法	242
8.4.2	冶金连接方法	243
8.5	研究内容与实验方案	245
8.5.1	研究内容	245
8.5.2	实验方案	246
8.6	泡沫铝夹心板制备工艺的研究	247
8.6.1	轧后发泡预制体的芯层形貌	247

8.6.2	发泡预制体快速加热工艺研究	248
8.6.3	泡沫铝夹心板泡孔演变研究	249
8.6.4	预制体发泡效果的影响因素	250
8.7	泡沫铝夹心板的准静态三点弯曲性能研究	254
8.7.1	泡沫铝夹心板的三点弯曲变形行为	254
8.7.2	泡沫铝夹心板弯曲性能的影响因素	256
8.8	泡沫铝夹心板的低速冲击性能研究	259
8.8.1	泡沫铝夹心板典型低速冲击力学性能曲线	260
8.8.2	胶黏泡沫铝夹心板的低速冲击性能	261
8.8.3	冶金结合泡沫铝夹心板的低速冲击性能	266
8.9	研究成果总结	268
	参考文献	269

9 汽车用铝合金复合箔的研究

275

9.1	汽车的轻量化与复合钎焊铝箔的应用	275
9.1.1	汽车的发展趋势	275
9.1.2	汽车用铝热交换器	277
9.2	复合钎焊铝箔的制造加工方法	279
9.2.1	热轧复合法	279
9.2.2	冷轧复合法	279
9.2.3	反向凝固法	280
9.3	汽车用复合钎焊铝箔的研究进展	281
9.4	研究内容及研究方案	283
9.4.1	研究内容	283
9.4.2	冷轧复合工艺研究方案	283
9.4.3	热轧复合工艺研究方案	285
9.5	复合钎焊铝箔热轧复合技术的研究	287
9.5.1	复合钎焊铝板热轧初结合强度的影响因素研究	287
9.5.2	复合箔包覆率影响因素的研究	290
9.5.3	复合箔抗下垂性能影响因素的研究	294
9.5.4	成品前退火制度对复合箔力学性能的影响	300
9.6	复合钎焊铝箔冷轧复合技术的研究	302
9.6.1	复合钎焊铝板冷轧初结合强度的影响因素研究	302
9.6.2	复合箔包覆率的检测结果及分析	305
9.6.3	成品前退火制度对复合箔力学性能的影响	307
9.6.4	复合箔抗下垂性能的检测结果及分析	309
	参考文献	311
	附 录	314

1 层状金属复合材料概论

1.1 复合材料

1.1.1 复合材料的定义

复合材料，是指由两种或两种以上异质、异形、异性的材料，通过物理或化学的方法，在宏观上复合而成的具有新性能的材料。复合材料一般是由基体组元与增强相或功能组元组成的。各种材料在性能上互相取长补短，产生协同效应，使复合材料的综合性能优于原组成材料而满足各种不同的要求。

1.1.2 复合材料的分类

复合材料发展至今，其种类十分多样，形成了各种不同的复合材料体系，并且其分类方法也较多。人们一般习惯根据复合材料的使用要求及增强相和基体的类型对其进行分类，常见的分类方法包括如下几种。

(1) 按使用要求分类

复合材料按使用要求可分为结构复合材料和功能复合材料。

结构复合材料主要在承载的工况条件下使用，一般要求其具有质量轻、强度和刚度较高，且能耐受一定温度等性能。结构复合材料是由增强相和基体复合而成的，前者是复合材料中承受载荷的主要组元，后者是使增强相彼此黏结从而形成整体，并起到传递应力和增韧的作用。

功能复合材料是指除机械性能以外还提供其他物理性能的复合材料，具有导电、磁性、吸波、透波、摩擦、阻尼、屏蔽、阻燃、防热、吸声等功能的复合材料统称为功能复合材料。功能复合材料主要由功能体或增强相及基体组成。随着复合材料的制备技术及工程化应用进程的不断发展，复合材料逐步实现了从军用产品向民用产品的过渡，加速了功能型复合材料的开发和应用。另外，导弹、航天飞行器以及其他军用产品的小型化和轻量化，也推动了单一的结构型复合材料向多功能复合材料方向的转变。

(2) 按基体材料分类

复合材料按基体材料分类可以分为聚合物基复合材料、金属基复合材料、无机非金属复合材料（包括陶瓷基和水泥基）等，具体划分情况如图 1-1 所示。

(3) 按增强材料分类

复合材料按增强材料分类可以分为纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料、片材增强复合材料和层叠式复合材料，如图 1-2 所示。其中，短切纤维在复合材料中的排列方式有

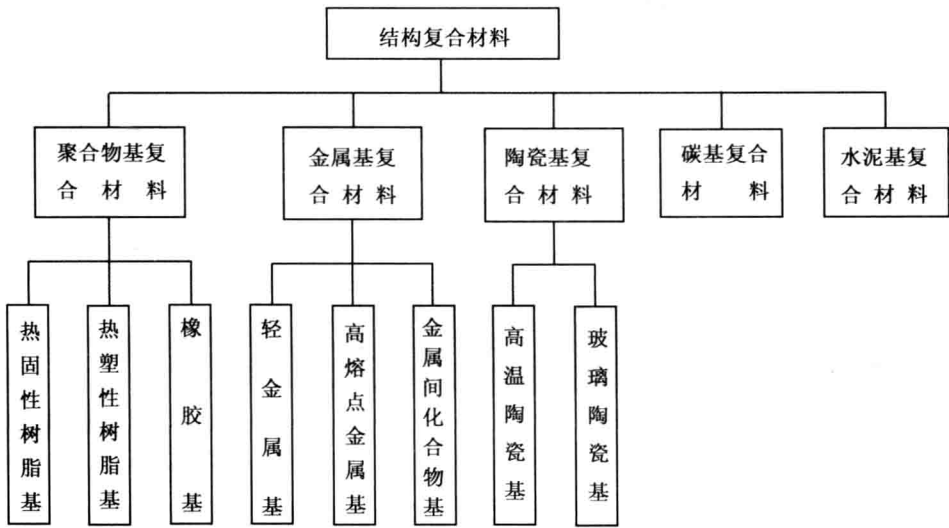


图 1-1 结构复合材料按不同基体分类

两种，一种为随机排列，另一种为定向排列。根据纤维的种类，纤维复合材料又可分为玻璃纤维、氧化铝纤维、氧化锆纤维、石英纤维、芳纶纤维、碳纤维、金属丝纤维复合材料。颗粒增强复合材料根据其增强作用机制，可分为弥散增强型和颗粒增强型两类。

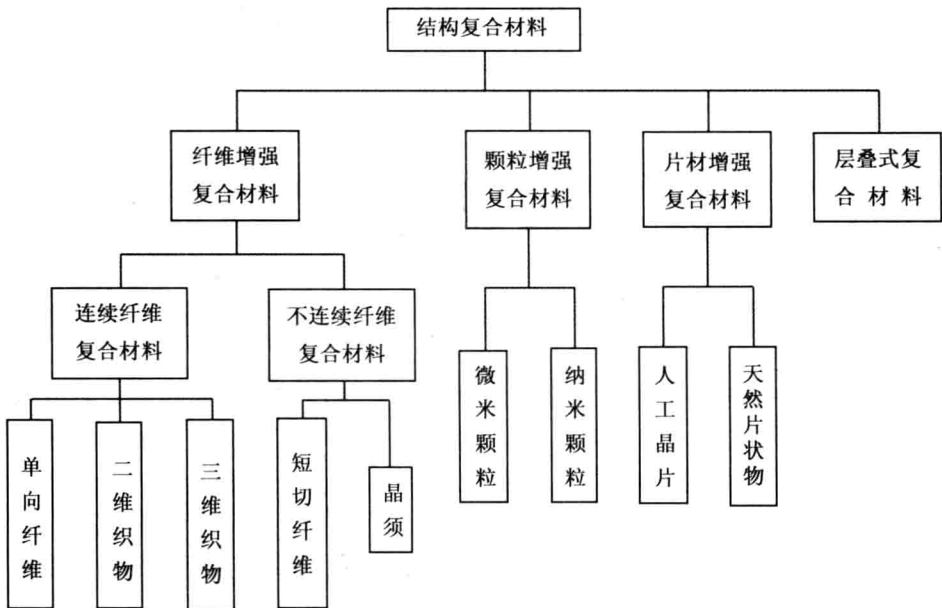


图 1-2 结构复合材料按不同增强相形式分类

1.1.3 金属基复合材料的分类

金属基复合材料是以金属或合金为基体，并以纤维、晶须、颗粒等为增强相而制得的复合材料。金属基复合材料种类较多，常见的金属基复合材料可以根据其用途、基体、增

强相的不同进行分类,具体分类情况如表 1-1 所示。

表 1-1 金属基复合材料的分类

按增强相分类	按基体分类	按用途分类
长纤维增强复合材料	铝基复合材料	结构复合材料
短纤维增强复合材料	镁基复合材料	功能复合材料
晶须增强复合材料	铜基复合材料	智能复合材料
颗粒增强复合材料	钛基复合材料	-
层状复合材料	高温合金基复合材料	-
表面复合材料	难熔金属基复合材料	-
混杂增强金属复合材料	金属间化合物基复合材料	-

(1) 以用途为分类标准

以用途为分类标准,可分为功能复合材料、结构复合材料和智能复合材料。其中,功能复合材料的特点为低线膨胀系数、耐磨性好、高导电导热性能和高阻尼性能,而结构复合材料的性能特点为高比模量、耐热性好、高比强度、尺寸稳定。智能材料的两个指导思想是材料的多功能复合和材料的仿生设计,因此,智能材料系统具有或部分具有传感功能、反馈功能、信息识别与积累功能、响应功能、自诊断能力、自修复能力、自调节能力等智能功能和生命特征。智能复合材料按功能可以分为光导纤维、形状记忆合金、压电、电流变体和电(磁)致伸缩材料等。

(2) 按基体合金的种类分类

按基体合金的种类分类,可分为铝基、镁基、铜基、钛基、高温合金基、金属间化合物基以及难熔金属基复合材料等。

① 铝基复合材料。金属铝为面心立方结构,所以铝基复合材料具有良好的塑性和韧性,而且这类材料还具有易加工性、工程可靠性及价格低廉等特点,这为其规模化工程应用创造了有利的条件。研究显示,铝及其大部分合金都适于作为金属基复合材料的基体,铝基复合材料的增强相可以是连续的纤维,也可以是短纤维,还可以是从球形到不规则形状的颗粒。目前,铝基复合材料常用的增强颗粒包括 SiC、 Al_2O_3 、BN 等,金属间化合物颗粒(Ni-Al、Fe-Al 及 Ti-Al 系)也可被用于铝基复合材料的增强相。

② 镁基复合材料。镁基复合材料是继铝基复合材料之后的又一具有竞争力的轻金属基复合材料,在某些方面其性能已超过了铝基复合材料。镁基复合材料由于具有低的密度、高的比强度和比模量、良好的耐磨性能和减振性能等优点,在航空航天及汽车工业中具有广阔的应用前景。目前,关于镁合金复合材料的研究工作主要集中于材料成分设计及界面反应、制备及合成工艺和材料结构及性能等方面。常用的基体合金主要有 Mg-Mn、Mg-Al、Mg-Zn、Mg-Zr、Mg-Li 和 Mg-RE 系,此外,还有适于较高温度下工作的 Mg-Ag 和 Mg-Y 系合金。镁基复合材料需根据其使用性能要求选择基体合金,侧重铸造性能时,可选择铸造镁合金为基体;需要较好的挤压、轧制加工能力时,则一般选用变形镁合金。镁基复合材料常用的增强相主要有碳纤维、Ti 纤维、B 纤维、 Al_2O_3 短纤维、SiC 晶须、 B_4C 颗粒、SiC 颗粒和 Al_2O_3 颗粒等。目前,镁基复合材料应用前景十分广阔,美国道化学公司使用 $Al_2O_3/p/Mg$ 复合材料制成了皮带轮、链轮、油泵盖等耐磨件,其中,汽车油泵盖累计行车可达 $1.6 \times 10^5 km$,并生产出了完全由 $Al_2O_3/p/Mg$ 复合材料制成的油泵。美国海军研究所和斯坦福大学利用 $B_4C/p/Mg-Li$ 、 $B_p/Mg-Li$ 复合材料制造出了结构复杂的

天线构件。

③ 钛基复合材料。钛基复合材料以其高的比强度、比刚度和抗高温、耐腐蚀性等特性，在航空航天、军事国防等领域具有广阔的应用前景，并且已成为超音速宇航飞行器和下一代先进航空发动机的候选材料。钛基复合材料按增强相类型可分为两大类：非连续颗粒增强和连续纤维增强钛基复合材料。钛基复合材料常用的基体材料见表 1-2，其中，Ti-6Al-4V 合金由于综合性能优良，从而作为钛基复合材料的基体得到了广泛应用。 β 基钛合金塑性好，而且具有良好的冷、热加工性能。近 α 钛合金 IMI834、Ti6242 本身就是性能优良的高温结构材料，增强相的加入使钛基复合材料的力学性能明显提高，扩大了这类材料的应用范围。由于硼与钛的线膨胀系数比较接近，硼纤维对钛合金具有较好的增强效果，所以硼纤维现在逐步成为钛基复合材料常用的增强相。

表 1-2 钛基复合材料的主要基体材料

类型	钛合金	使用温度/℃
β	Ti-15V-3Gr	常温
β	β -21S	常温
$\alpha + \beta$	Ti-6Al-4V	300
近 α	Ti6242	450
近 α	IMI834	600
α_2	Ti ₃ Al	700
γ	TiAl	900

④ 铜基复合材料。铜基复合材料不仅强度高，导电性和导热性与纯铜相近，而且还具有良好的抗电弧侵蚀和抗磨损能力，是一种具有广阔应用前景的新型材料。随着航空航天、机械、电子工业的发展，对这类具有高导电、高导热和高强度复合材料的需求将越来越迫切。现有的铜基复合材料可分为显微复合铜合金、颗粒增强铜基复合材料及纤维增强铜基复合材料。显微复合铜合金是一种 Cu-X 二元合金，以其超高强度、高导电率以及良好的耐热性能，有望用于热交换器、推进器、焊接电板等。颗粒增强铜基复合材料与铜基合金相比，具有更高的比强度和较好的高温强度，常用的颗粒有金属颗粒（如钢颗粒、钨颗粒等）和陶瓷颗粒（如 SiC、Al₂O₃、AlN、TiC、TiB₂、ZrC、WC、纳米碳管等）。碳纤维/铜复合材料具有较高的强度，良好的传导性、耐磨性、耐蚀性、耐电弧烧蚀性和抗熔焊性等一系列优点，已被广泛应用于电子元件材料、滑动材料、触头材料、集成电路散热板及耐磨器件等领域。

⑤ 镍基复合材料。镍的高温性能优良，故镍基复合材料主要用于制造高温下工作的零部件。SiC 颗粒或纤维增强的镍基复合材料可具有理想的高强度、高刚度和抗蠕变性能，是广泛使用于各种燃气轮机的重要材料。

(3) 按增强相类型分类

按增强相类型分类，可以分为连续纤维增强金属基复合材料、短纤维增强金属基复合材料、晶须增强金属基复合材料、颗粒增强金属基复合材料、混杂增强金属基复合材料等。

① 颗粒增强金属基复合材料。颗粒增强金属基复合材料是将颗粒增强相外加或自生进入金属基体中得到的兼有金属优点（韧性和塑性）和增强颗粒优点（高硬度和高模量）

的复合材料。常选用的颗粒有 SiC、TiC、B₄C、WC、Al₂O₃、Si₃N₄、TiB₂、BN 及石墨等，颗粒的尺寸一般在 3.5 ~ 10 μm，体积分数在 20% 以上。硬质颗粒增强相是主要的承载相，对基体起到束缚作用，阻止基体屈服，而基体的作用在于传递载荷和便于加工。颗粒增强金属基复合材料兼具金属与非金属的综合性能，材料的强韧性、耐磨性、耐热性、导电导热性及耐候性能适应广泛的工程要求，且比强度、比模量及耐热性超过基体金属，对航空航天等尖端领域的发展具有重要作用。因为金属基复合材料的增强相不同，其制备方法也不同。颗粒增强金属基复合材料的制备方法主要有粉末冶金法、喷射沉积法、原位反应法、搅拌铸造法和挤压铸造法等。

② 连续纤维增强金属基复合材料。纤维增强金属基复合材料是利用无机纤维（或晶须）及金属细线等增强金属得到的质量轻且强度高的材料，纤维直径为 3 ~ 150 μm（晶须直径小于 1 μm）。在现有的各种增强相类型中，高性能连续纤维具有最明显的增强效果和更高的强度及刚度。连续纤维增强复合材料具有明显的各向异性，并且其复合和加工工艺独特、复杂、不易掌握和控制，导致该类复合材料的制造成本很高。因此，连续纤维增强金属基复合材料主要用于较少考虑成本的航天、航空等尖端技术领域。

③ 短纤维增强金属基复合材料。作为金属基复合材料增强相的短纤维，可分为天然纤维制品和短切纤维。天然纤维主要是一些植物纤维和菌类纤维等，长度一般为 35 ~ 150 mm；短切纤维一般是由连续纤维（长纤维）切割而成的，长度为 1 ~ 50 mm，用于金属基复合材料短纤维增强相的材料主要有 Al₂O₃、SiC 等。短纤维增强金属基复合材料的成本比连续纤维增强金属基复合材料低得多，与基体合金相比，短纤维增强金属基复合材料具有较高的比强度、比刚度和高耐磨性，其各向异性要远远小于连续纤维增强复合材料。短纤维增强金属基复合材料中增强相的体积分数一般不超过 30%，主要用于汽车行业、电力行业等。

④ 晶须增强金属基复合材料。晶须是指在特定条件下以单晶的形式生长而成的一种高纯度纤维，其原子排列高度有序，几乎不含晶界及位错等晶体结构缺陷，具有异乎寻常的力学性能。作为金属基复合材料的增强相使用的晶须中，使用范围最广、性能较好的是 SiC、SiN₄ 晶须，成本最低的是 Al₂O₃、B₂O₃ 晶须。与连续纤维增强金属基复合材料相比，晶须增强金属基复合材料的各向异性极小；与短纤维增强复合材料相比，晶须增强复合材料的性能更高。晶须在复合材料中的体积分数一般不超过 30%，这类材料主要用于航空航天等高新技术领域，如飞机架构、推进杆加强筋等。

⑤ 混杂增强金属基复合材料。对上述四种单一的增强形式进行有机的组合就形成了混杂增强。增强相的混杂组合可分为三种：颗粒 - 短纤维（或晶须）、连续纤维 - 颗粒、连续纤维 - 连续纤维。在短纤维或晶须的预制件中，易出现增强相的黏结、团聚等现象，而颗粒的混入可以很好地解决这一问题。与单一的增强金属基复合材料相比，混杂增强可以大幅度提高材料的横向强度，改善材料的力学性能。

⑥ 层片复合材料。以强度高、模量高的片层材料为增强相重复排列组成的金属基复合材料被称为层片复合材料。由于片层间的距离是微观的，所以在正常的比例下，材料按照其结构组元来看，可以认为是各向异性的和均匀的。但因层片增强的强度不如纤维的增强强度高，所以层片结构复合材料的使用一度受到了限制。然而，由于在增强平面的各个方向上，层片增强对强度和模量都有显著的增强效果，这和纤维单向增强复合材料相比具

有明显的优越性。

1.2 金属基复合材料的性能特点及应用

1.2.1 金属基复合材料的性能

金属基复合材料的性能取决于所选金属或合金基体和增强相的特性、含量、分布等。通过优化组合可以获得既具有金属特性，又具有高比强度、高比模量、耐热、耐磨等优良综合性能的复合材料。金属基复合材料具有以下性能特点。

(1) 高比强度和高比模量

在金属基体中加入适量的高比强度、高比模量、低密度的纤维、晶须、颗粒等增强相，能明显提高复合材料的比强度和比模量。密度只有 1.8g/cm^3 的碳纤维的最高强度可达到 7000MPa ，比铝合金的强度高出 10 倍以上，石墨纤维的最高模量可达到 91GPa 。加入质量分数为 30% ~ 50% 的高性能纤维作为复合材料的主要载体，复合材料的比强度、比模量成倍地高于基体合金或金属的比强度和比模量。

(2) 导热和导电性能

金属基复合材料中，金属基体一般占有 60% 以上的体积分数，因此仍保持金属所具有的良好导热和导电性。金属基复合材料采用高导热性的增强相可以进一步提高导热性能，使热导率比纯金属基体还高。良好的导热性可有效地传热、散热，减少构件受热后产生的温度梯度。现已研制成功的超高模量石墨纤维、金刚石纤维、金刚石颗粒增强铝基和铜基复合材料的导热率比纯铝和钢还高，用它们制成的集成电路底板和封装件可有效、迅速地把热量散去，提高集成电路的可靠性。同时，良好的导电性还可以防止飞行器构件产生有害的静电聚集。

(3) 热膨胀系数小，尺寸稳定性好

金属基复合材料中所用的增强相碳纤维、碳化硅纤维、晶须、颗粒、硼纤维等既具有很小的热膨胀系数，又具有很高的模量。加入相当含量的增强相不仅可以大幅度地提高材料的强度和模量，也可以使其热膨胀系数明显下降，并可通过调整增强相的含量获得不同的热膨胀系数，以满足各种工作情况的要求。金属或者合金基体的种类、特性以及增强相含量的多少、性质、分布情况等因素决定了金属基复合材料具有什么样的性能。优化组合这些因素就可以获得具有优良综合性能的复合材料。

(4) 良好的耐高温性能

金属基复合材料具有比金属基体更好的耐高温性能，特别是连续纤维增强金属基复合材料。在复合材料中，纤维起着主要的承载作用，纤维强度在高温下基本不下降，保证了纤维增强金属基复合材料的高温性能可保持到接近金属的熔点。金属基复合材料被选用在发动机等高温零部件上，可大幅度地提高发动机的性能和效率。

(5) 耐磨性好

金属基复合材料，尤其是陶瓷纤维、晶须、颗粒增强金属基复合材料具有很好的耐磨性。在基体金属中加入大量硬度高、耐磨、化学性能稳定的陶瓷增强相，特别是细小的陶瓷颗粒，不仅提高了材料的强度和刚度，也提高了复合材料的硬度和耐磨性。高耐磨的

SiC/Al 复合材料用于汽车发动机、刹车盘、活塞等重要零件，明显提高了零件的性能和寿命。

(6) 良好的疲劳性能和断裂韧性

金属基复合材料的疲劳性能和断裂韧性取决于纤维等增强相与金属基体的界面结合状态、增强相在金属基体中的分布、金属和增强相本身的特性等，特别是界面状态。最佳的界面结合状态既可有效地传递载荷，又能阻止裂纹的扩展，提高材料的断裂韧性。

(7) 不吸潮，不老化，气密性好

与聚合物相比，金属基复合材料的性质稳定，组织致密，不存在老化、分解、吸潮等问题，也不会发生性能的自然退化，而且气密性优良，在太空环境下使用不会分解出低分子物质污染仪器和环境。

1.2.2 金属基复合材料的应用

金属基复合材料具有非常好的综合性能，这些性能使其无论是在军用的航空航天、武器研发，还是在民用的电子通讯、汽车产业等方面，都有着巨大的潜力和应用市场。

1.2.2.1 汽车制造领域

轻量化、降低油耗和排放以及提高性能并保证安全是汽车工业发展的主要方向。为了降低油耗量，除改进汽车的设计、研制省油的发动机外，汽车车体的轻量化对降低油耗的作用亦非常明显。一般汽车每减轻 1kg 的质量，1L 汽油可使汽车多行驶 1.1m 的路程。汽车轻量化不仅能降低油耗，还能减少轮胎磨损，延长汽车的使用寿命。美国在汽车工业领域大量使用复合材料，1981 年用在小型乘用车上的复合材料为 10 万吨，1987 年达到 18 万吨；1982 年，载重汽车使用复合材料 314 万吨，1987 年达到 514 万吨。美国研制的全塑复合材料结构汽车与钢结构汽车相比，每辆汽车的质量减轻 570kg，可节约燃油 25%。由于金属基复合材料具有高的比强度、比模量，良好的耐磨性和热强性以及低的线膨胀系数，可望在汽车制造领域起到提高效率、延长寿命、增强安全性和净化环境等重要作用。从汽车工业的成本考虑，金属基复合材料采用非连续纤维或短纤维、晶须、颗粒增强最为有利。

(1) 活塞及活塞环

内燃发动机活塞由于在高温高压下工作，服役条件十分恶劣。随着发动机功率的提高和活塞工作寿命的延长，普通的铝合金活塞难以满足要求。复合材料与基体合金相比，其高温强度和抗热疲劳性能明显提高，并具有较低的线膨胀系数，这些性能对提高活塞使用寿命、降低油耗和废气排放量、提高发动机功率具有极其重要的意义。

随着复合材料制备技术的发展及性能的不断提高，采用陶瓷纤维（包括短纤维和晶须）增强铝基复合材料代替奥氏体铸铁环具有更突出的优点。铝基复合材料的耐磨性已达到耐蚀高镍铸铁的水平，而制成活塞和活塞环后质量大大减轻，这对提高发动机的功率十分有利。日本丰田汽车公司从 1983 年开始生产这种活塞，1988 年的产量为 240 万件。

汽车采用金属基复合材料最先是為了改进发动机活塞的强度和耐磨性。1983 年，丰田汽车公司使用陶瓷纤维通过压力铸造生产活塞，获得了更高的耐磨性和抗咬合能力。碳化硅颗粒或晶须增强铝基复合材料也正在试用于制造汽车发动机活塞，由于它的耐热性、耐磨性和强度均十分理想，所以可采用这种复合材料制造柴油机活塞。