

# 高性能弥散强化铜基 复合材料及其制备技术

田保红 宋克兴 刘平等 著



科学出版社

# 高性能弥散强化铜基复合材料 及其制备技术

田保红 宋克兴 刘平等 著

本书由河南科技大学学术著作出版基金资助出版

科学出版社

北京

# 前 言

铜及铜合金由于具有优异的物理和力学性能,在电子工业等诸多领域得到广泛的应用。但是随着高科技产业的发展,特别是微电子工业的快速发展,传统铜合金的性能已不能满足要求,尤其在强度和导电性两方面不能兼顾。为此,近年来世界各国都在开发同时具有高强度和高导电性能的铜合金材料,并已经取得了很大的进展。其中,氧化物、碳化物、氮化物、硼化物等颗粒弥散强化铜基复合材料异军突起,成为一些高技术和国民经济领域不可或缺的关键结构/功能材料。

颗粒弥散强化铜基复合材料,是在铜或铜合金基体中通过不同工艺技术引入了细小弥散分布的弥散相粒子,从而使基体强度,特别是高温强度得到大幅度提高的一种复合材料。颗粒弥散强化铜基复合材料因其优良的高温强度、高导电性和高导热性,已广泛地应用于金属熔铸、电子信息、电真空器件、高压开关,以及高速电气化铁路装备和汽车制造等行业中的电阻焊电极、大推力火箭发动机内衬、结晶器、弓网等高新技术领域。其中,内氧化技术制备的氧化物弥散强化铜近年来发展迅速。

国内对颗粒弥散强化铜的研究虽然起步较晚,但在高性能颗粒弥散强化铜复合材料领域的研发取得了令人瞩目的成就。20世纪90年代以来,国内许多研究单位对该系列材料给予了极大的关注,对该材料进行了实验研究和产业化开发,取得了很大进展。但在某些方面,如大直径颗粒弥散强化铜制品方面,与国外先进水平相比仍有较大差距。近年来,河南科技大学和中铝洛阳铜业有限公司等单位开展合作,在颗粒弥散铜基复合材料的基础理论,如内氧化热力学、动力学、微观结构和界面结构、粒度分布规律、高温性能、使用性能等,以及制备工艺的简化和产品性能的提高等方面取得了较大进展。

目前国内相关出版物对颗粒增强金属基复合材料的论述,主要集中在黑色金属和铝合金、镁合金等轻金属基复合材料,作者期望本书的出版有助于颗粒弥散强化(增强)铜基复合材料的进一步研发和拓展应用领域。

本书由田保红、宋克兴、刘平、李红霞和刘勇撰写。其中,第1章、第2.9节、第3章、第4章和第9章由田保红教授和刘勇副教授撰写,第5章、第6章和第7章由宋克兴教授和上海理工大学刘平教授撰写,第2.1~2.8节、第8章、第10章和第11章由李红霞高级工程师撰写。张毅博士绘制了本书部分图表。全书由田保红教授负责统稿,上海理工大学刘平教授担任主审。

河南科技大学董企铭教授和康布熙教授在本书的撰写过程中提出了许多宝贵

的意见。河南科技大学王顺兴教授、任凤章教授、赵冬梅教授、贾淑果副教授、李炎教授和张毅博士等也参与了部分研究工作。河南科技大学材料科学与工程学院硕士研究生韩胜利、李红霞、李士凯、国秀花、刘瑞华、王青、林阳明、张毅、陈小红、朱建娟、夏承东、周洪雷、李晓燕、代永强、苏凡凡、杨争、张金东、张晓伟和赵瑞龙等也参与了部分实验工作。在此向上述人员表示衷心的感谢。同时,有关项目的研究工作得到河南省有色金属材料科学与工程重点实验室王文焱教授、祝要民教授、郟建新高级工程师、刘亚民高级工程师、周伯楚高级工程师、王长生高级实验师、杜三明博士、刘玉亮博士、刘重喜高级技师和张兴渊工程师等的大力支持,特此致谢。

本书的有关项目研究得到国家高技术研究发展计划(863计划)项目(项目编号:2006AA03Z528)、国家自然科学基金(项目编号:50571035)、河南省杰出青年科学基金项目(项目编号:0512002700)、河南省重点攻关项目(项目编号:2007430004)、河南省高校杰出科研人才工程(项目编号:2007KYCX0008)、河南省科技创新杰出青年基金资助项目(项目编号:094100510005)、河南省高校创新人才培养工程(项目编号:豫教高2005-126文)、河南省教育厅自然科学研究项目(项目编号:200510464026)、河南省教育厅科技攻关资助项目(项目编号:2007430004)、河南省教育厅自然科学研究资助项目(项目编号:2008A430007)、洛阳市重点科技攻关项目(项目编号:020902)、河南科技大学重大科技前期预研专项资助项目(项目编号:2005ZD003)、河南科技大学博士启动科研基金等项目的资助。

本书的出版得到河南科技大学学术著作出版基金和河南科技大学材料科学与工程学院的支持。

感谢河南科技大学、上海理工大学和科学出版社在本书撰写过程中所给予的大力支持。

书中的主要工作是作者近年来研究工作的总结,也参考了一些国内外发表的文献资料和同行的一些研究成果,在书中都以参考文献的形式列出,特向有关作者致谢,文中如有不当和疏漏之处,敬请各位谅解。由于作者水平有限,书中难免有不足和疏漏之处,恳请读者不吝批评指正。

作者  
2010年8月  
于河南科技大学

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 金属基复合材料概述	1
1.1.1 复合材料概述	1
1.1.2 金属基复合材料设计原则	6
1.1.3 金属基复合材料分类	11
1.1.4 金属基复合材料制备工艺	14
1.1.5 金属基复合材料研究进展	18
1.2 弥散强化铜基复合材料概述	21
1.2.1 弥散强化铜基复合材料分类	21
1.2.2 弥散强化铜基复合材料的性能特点	22
1.2.3 弥散强化铜基复合材料颗粒增强相的选择	24
1.2.4 弥散强化金属基复合材料的相界面结合机制及界面优化设计	25
1.3 弥散强化铜基复合材料研究进展	27
1.3.1 内氧化制备弥散强化铜基复合材料研究进展	27
1.3.2 其他制备方法研究进展	33
参考文献	34
第 2 章 高性能弥散强化铜基复合材料及其应用	36
2.1 概述	36
2.1.1 弥散强化理论概述	36
2.1.2 弥散强化铜基复合材料的性能特点及应用	38
2.1.3 弥散强化铜基复合材料制备方法	41
2.1.4 弥散强化铜基复合材料的发展与现状	44
2.2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料	45
2.2.1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的内氧化制备	45
2.2.2 影响 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料性能的因素	46
2.3 $\text{TiB}_2/\text{Cu}$ 复合材料	48
2.3.1 $\text{TiB}_2$ 陶瓷材料概述	48
2.3.2 $\text{TiB}_2/\text{Cu}$ 复合材料的研究及制备方法	50
2.3.3 $\text{TiB}_2/\text{Cu}$ 复合材料点焊电极	54

2.4	WC/Cu 复合材料	57
2.4.1	WC 的结构和性能	57
2.4.2	WC/Cu 复合材料	58
2.5	金刚石/Cu 复合材料	59
2.5.1	制备方法	59
2.5.2	金刚石/Cu 复合材料	59
2.6	石墨/Cu 复合材料	61
2.6.1	石墨/Cu 复合材料的制备技术研究现状	61
2.6.2	石墨含量和工艺参数对石墨/Cu 复合材料性能的影响	63
2.6.3	改善石墨/Cu 复合材料界面结合的方法	64
2.6.4	添加物对提高石墨/Cu 复合材料综合性能的影响	66
2.6.5	石墨/Cu 复合材料的应用	66
2.7	纳米碳管/Cu 复合材料	67
2.7.1	纳米碳管概述	67
2.7.2	纳米碳管/Cu 复合材料的制备及强化机制分析	68
2.7.3	纳米碳管/Cu 复合材料的应用前景	68
2.8	Ti <sub>3</sub> SiC <sub>2</sub> /Cu 复合材料	68
2.8.1	Ti <sub>3</sub> SiC <sub>2</sub> /Cu 复合材料的制备	69
2.8.2	Ti <sub>3</sub> SiC <sub>2</sub> /Cu 复合材料的性能	69
2.9	弥散铜/Cr 复合材料	70
2.9.1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 弥散强化铜-25%Cr 复合材料制备及组织性能	70
2.9.2	Cu-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cr 复合材料真空热压烧结-内氧化制备与组织性能	77
	参考文献	87
<b>第3章</b>	<b>熔铸技术</b>	94
3.1	概述	94
3.1.1	熔铸技术分类	94
3.1.2	熔铸成形方法与特点	95
3.1.3	熔铸成形的技术问题	96
3.1.4	熔铸技术在弥散强化铜基复合材料中的应用	98
3.2	熔铸技术	99
3.2.1	传统铸造技术	99
3.2.2	半固态铸造技术	102
3.2.3	正压铸造技术	105
3.2.4	负压铸造技术	112
3.2.5	反应铸造技术	114

3.3 熔铸弥散强化铜基复合材料的组织和性能 .....	116
3.3.1 熔铸 CuCr25RE 触头材料组织和性能 .....	116
3.3.2 触头材料用铜合金电击穿性能 .....	135
3.3.3 半固态铸造制备铜基复合材料性能 .....	146
参考文献 .....	150
<b>第4章 熔渗技术</b> .....	<b>152</b>
4.1 引言 .....	152
4.1.1 熔渗概论 .....	152
4.1.2 熔渗 Cu-Cr 合金 .....	157
4.1.3 熔渗 Cu-Cr 合金的电性能特点 .....	158
4.1.4 熔渗 Cu-Cr 合金的应用 .....	158
4.2 熔渗 Cu-Cr 合金的制备技术 .....	159
4.2.1 熔渗 Cu-Cr 合金制备技术及分类 .....	159
4.2.2 熔渗 Cu-Cr 合金的粉末粒度 .....	161
4.2.3 熔渗工艺参数的选择与控制 .....	162
4.3 熔渗 Cu-Cr 合金的组织和性能 .....	165
4.3.1 熔渗 Cu-Cr 合金显微组织 .....	165
4.3.2 熔渗 Cu-Cr 合金的性能 .....	167
4.3.3 Cr 含量和后续处理对熔渗 Cu-Cr 合金性能的影响 .....	168
4.3.4 Cr 粉颗粒形态及对电性能的影响 .....	171
4.3.5 熔渗 Cu-Cr 合金孔隙特征及对吸放气性能和重燃率的影响 .....	173
4.3.6 Cu 与 Cr 颗粒结合强度及与耐压、电蚀率和抗熔焊性的关系 .....	173
参考文献 .....	174
<b>第5章 粉末冶金技术</b> .....	<b>176</b>
5.1 概述 .....	176
5.2 粉末冶金工艺原理 .....	180
5.2.1 粉末制备 .....	181
5.2.2 成型 .....	181
5.2.3 烧结 .....	181
5.2.4 后续处理 .....	184
5.3 粉末冶金制备技术 .....	184
5.3.1 雾化法制备技术 .....	184
5.3.2 温压技术 .....	185
5.3.3 流动温压技术 .....	185
5.3.4 模壁润滑技术 .....	186

5.3.5	高速压制技术	186
5.3.6	动力磁性压制技术	186
5.3.7	爆炸压制技术	187
5.3.8	金属粉末注射成形技术	187
5.3.9	微注射成型	187
5.3.10	快速原型制作技术	188
5.4	粉末冶金弥散强化铜基复合材料的组织和性能	188
5.4.1	球磨工艺参数的影响	188
5.4.2	压制工艺参数的影响	191
5.4.3	烧结工艺参数的影响	195
5.4.4	热挤压工艺的影响	199
5.4.5	冷加工工艺的影响	203
5.5	快速凝固粉末冶金技术	204
5.5.1	快速凝固粉末制备技术	205
5.5.2	快速凝固-粉末冶金工艺	210
5.5.3	快速凝固喷射沉积工艺	210
	参考文献	212
<b>第6章</b>	<b>机械合金化技术</b>	<b>214</b>
6.1	概述	214
6.2	机械合金化原理	214
6.2.1	形成非晶的基本原理	215
6.2.2	形成金属间化合物的基本原理	217
6.2.3	形成纳米晶的基本原理	217
6.2.4	形成超饱和固溶体的基本原理	218
6.2.5	Maurice-Courtney 模型	220
6.2.6	Magini-Iasonna 模型	221
6.3	机械合金化技术的应用	222
6.3.1	机械合金化在弥散强化超合金制备中的应用	223
6.3.2	机械合金化在非晶态合金制备中的应用	224
6.3.3	机械合金化在功能材料制备中的应用	224
6.4	机械合金化弥散强化铜基复合材料	227
6.4.1	机械合金化弥散强化铜基复合材料的组织和性能	227
6.4.2	高能球磨工艺参数的影响	234
6.4.3	压制工艺参数的影响	236
6.4.4	烧结工艺参数的影响	237



6.4.5 机械合金化制备弥散强化铜基复合材料存在的问题及发展趋势 .....	241
参考文献 .....	242
<b>第7章 内氧化制备技术</b> .....	<b>244</b>
7.1 概述 .....	244
7.2 内氧化法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的典型工艺 .....	246
7.2.1 内氧化法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的典型工艺 .....	246
7.2.2 雾化制粉 .....	247
7.2.3 氧化剂制备 .....	249
7.2.4 混合粉末 .....	249
7.2.5 内氧化 .....	249
7.2.6 还原 .....	250
7.2.7 压制成型 .....	250
7.2.8 烧结 .....	252
7.2.9 热挤压 .....	252
7.2.10 拉拔 .....	253
7.3 $\text{Cu-Al}$ 合金内氧化热力学 .....	253
7.3.1 二元合金发生内氧化的条件 .....	253
7.3.2 $\text{Cu-Al}$ 合金内氧化热力学 .....	254
7.3.3 氧源的制备 .....	257
7.4 内氧化动力学 .....	260
7.4.1 平板试样的内氧化动力学 .....	261
7.4.2 圆柱试样内氧化动力学的研究 .....	266
7.4.3 球形试样内氧化动力学 .....	270
7.4.4 材料形状对内氧化动力学的影响 .....	272
7.5 内氧化过程中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒的形核、长大和粗化 .....	274
7.6 内氧化法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料主要性能 .....	277
7.6.1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的塑性变形与再结晶 .....	277
7.6.2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的高温拉伸特性 .....	280
7.6.3 高温流变应力 .....	286
7.6.4 载流摩擦磨损性能 .....	289
7.7 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料在点焊电极上的应用 .....	293
7.7.1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料点焊电极的装机试验 .....	294
7.7.2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料点焊电极的特性和失效形式 .....	294
参考文献 .....	297

<b>第 8 章 反应合成原位复合技术</b> .....	300
8.1 概述 .....	300
8.2 反应合成原位复合工艺原理 .....	303
8.2.1 熔铸-原位反应喷射成形技术 .....	304
8.2.2 自蔓延-原位反应合成技术 .....	306
8.2.3 放热弥散技术 .....	308
8.2.4 直接氧化技术 .....	309
参考文献.....	311
<b>第 9 章 表面弥散强化铜制备技术</b> .....	314
9.1 概述 .....	314
9.2 表面弥散强化铜制备原理 .....	314
9.2.1 表面内氧化 .....	314
9.2.2 激光表面合金化 .....	315
9.3 表面弥散强化铜制备工艺 .....	316
9.3.1 表面内氧化法 .....	316
9.3.2 高温扩渗-内氧化法 .....	317
9.3.3 激光表面合金化法.....	318
9.4 表面弥散强化铜组织和性能 .....	319
9.4.1 内氧化制备表面弥散强化铜组织和性能 .....	319
9.4.2 高温扩渗-内氧化表面弥散强化铜组织和性能 .....	347
9.4.3 激光表面合金化 Cr 弥散强化铜组织和性能.....	365
参考文献.....	370
<b>第 10 章 其他制备技术</b> .....	373
10.1 概述.....	373
10.2 复合电沉积法.....	373
10.3 反应喷射沉积法.....	374
10.4 共沉积法.....	375
10.5 溶胶-凝胶法 .....	376
10.6 碳热还原法.....	376
10.7 液相合金混合原位反应法.....	378
10.8 化学沉淀法.....	378
参考文献.....	379
<b>第 11 章 弥散强化铜基复合材料的后续加工技术</b> .....	381
11.1 概述.....	381
11.2 可锻性.....	381

---

11.2.1 预成形坯材料相对密度对可锻性的影响 .....	382
11.2.2 打击能量对预成形坯材料可锻性的影响 .....	382
11.2.3 应力状态对预成形坯材料可锻性的影响 .....	383
11.2.4 预成形坯高径比对可锻性的影响 .....	384
11.3 热挤压致密化和精密成型技术 .....	384
11.3.1 热挤压致密化 .....	384
11.3.2 精密成型技术特点 .....	386
11.4 冷加工技术 .....	386
11.4.1 水切割 .....	387
11.4.2 钻孔 .....	387
11.4.3 磨削 .....	388
11.4.4 车削 .....	388
11.5 弥散强化铜与 Be、W 的扩散连接技术 .....	389
11.5.1 Be 与 Cu 合金的扩散连接 .....	389
11.5.2 W 与 Cu 合金的扩散连接和过渡液相扩散连接 .....	389
11.6 其他加工新技术 .....	390
参考文献 .....	390

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 金属基复合材料概述

### 1.1.1 复合材料概述

#### 1. 复合材料的概念

复合材料<sup>[1,2]</sup>, 国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)的定义为:“由两种及以上物理和化学性质不同的物质结合起来而得到的一种多相固体材料”。从制备的角度来看,复合材料是由两种或两种以上异质、异形、异性的原材料通过某种工艺组合而成的一种新的材料,它既保留了原组分材料的主要特性,又通过复合效应获得了原组分材料所不具备的新性能。每一种材料都有其性能上的优势与不足,通过相互复合,取长补短,可使它们的特性得以充分发挥,获得最佳技术经济效果。因此复合材料是新材料制备研究的一个重要发展方向。例如,金属比较坚韧,但多数不耐高温,陶瓷耐高温,但很脆,如果把它们掺合在一起,二者组合成的复合材料——金属陶瓷兼有金属和陶瓷的优点。再如,把高强度玻璃纤维混在柔软的树脂中形成的玻璃纤维增强树脂基复合材料,则有密度小、强度高、抗腐蚀及成形工艺简单等优点,其性能可与钢铁媲美。

不同的非金属材料、金属材料之间,以及非金属材料与金属材料之间都可以相互复合,从而得到丰富多彩的复合材料。复合材料通常由基体材料和增强材料两部分组成:基体一般选用强度、塑性、韧性好的材料,如聚合物、橡胶、金属等;增强材料则选用高强度、高弹性模量的材料,如玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、陶瓷颗粒等。复合材料的性能取决于增强体与基体的比例,以及两者结合界面的特性。现代复合材料可以通过设计使各组分的性能互相补充并彼此关联,从而获得新的优异性能,它与一般材料的简单混合有着本质的区别。

一般材料经过简单混合得到的混合材料与复合材料的本质区别主要体现在两个方面:一是复合材料不仅保留了原组分材料的特点,而且通过各组分的相互补充和关联可以获得原组分所没有的、新的优越性能;二是复合材料的可设计性,如结构复合材料不仅可根据材料在使用中受力的要求进行组元选材设计,更重要的是还可以通过调整增强体的比例、分布、排列和取向等因素,进行复合材料结构设计。

## 2. 复合材料的分类<sup>[1,2]</sup>

### 1) 按照使用功能分类

复合材料有多种分类方法,按照使用功能要求分为两类:结构复合材料和功能复合材料。结构复合材料主要是作为承力结构使用的复合材料,以力学性能作为其主要使用性能,它基本上是由能承受载荷的增强体组元与能连接增强体成为整体承载,同时又起分配与传递载荷作用的基体组元构成。结构复合材料的特点是可根据材料在使用中受力的要求进行组元选材和增强体排布设计,从而充分发挥各组元的效能。功能复合材料具有某种特殊的物理或化学特性,如声、光、电、磁、热、耐腐蚀、零膨胀、阻尼、摩擦或换能等,以理化性能作为其主要使用性能。

### 2) 按照增强体几何形态分类

复合材料按增强体的几何形态分为纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料、薄片增强复合材料和叠层复合材料。

纤维增强复合材料又分为连续纤维增强复合材料和非连续纤维(包括晶须和短纤维)增强复合材料。例如,玻璃纤维增强树脂基复合材料(玻璃钢)、纤维增强陶瓷、大变形原位纤维增强铜基复合材料 Cu-15%Cr 等。

颗粒增强复合材料的增强体是不同尺寸的球形或者非球形颗粒。颗粒增强复合材料按照分散相的尺寸大小和间距又分为弥散增强复合材料(颗粒等效直径为  $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ ,颗粒间距为  $0.01\sim 0.3\mu\text{m}$ )和粒子增强复合材料(颗粒等效直径为  $1\sim 50\mu\text{m}$ ,颗粒间距为  $1\sim 25\mu\text{m}$ ),前者如内氧化法制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  弥散强化铜基复合材料,后者如离心铸造 WC 颗粒增强钢基耐磨复合材料轧辊,但在实际应用中两者并不严格区分,统称颗粒增强金属基复合材料(particulate reinforced metallic matrix composites, PRMMCs)。还有一类颗粒增强体是空心微球(微球直径  $10\sim 30\mu\text{m}$ ,壁厚  $1\sim 4\mu\text{m}$ ),分为有机微球、无机微球和金属微球三种,主要用做热固性与热塑性高聚物的增强体或填料。颗粒型增强体的主要作用是调节复合材料的导电性、导热性,改善摩擦磨损性、降低热膨胀系数、提高耐热温度及调节复合材料的密度。

薄片增强复合材料的增强体是长与宽尺寸相近的薄片。薄片增强体由天然、人造和在复合材料工艺过程中自身生长三种途径获得。天然的片状增强体的典型代表是矿产云母,人造的片状增强体是有机玻璃(又称玻璃鳞片)、铝、铍、银、二硼化铝( $\text{AlB}_2$ )等。自身生长薄片增强体的实例为二元共晶合金 Al-Cu 中的  $\text{CuAl}_2$  片状晶。天然和人造片状增强体的含量可以在较大范围内变动。当金属薄片紧密堆叠时,还可在片的平面方向提供导电和导热性,而在片的法线方向提供电磁波屏蔽。

叠层复合材料,又称层合复合材料,指复合材料中的增强体是分层铺叠的,即

按相互平行的层面配置增强体,而各层之间通过基体材料连接。叠层复合材料中的“层”,可以是单向无纬布、浸胶纤维布,如玻璃纤维布、碳纤维布或棉布、合成纤维布、石棉布等,也可以是片状材料,如纸张、木材,以及混杂叠层复合材料中的铝箔。也有将双金属层合片、涂覆金属和夹层玻璃归于叠层复合材料,如钢-铜-塑料三层复合无油润滑轴承材料等。叠层复合材料在平行于其层面方向具有优良的性能。

### 3) 按照增强体的来源分类

根据复合材料中增强体的来源,又将复合材料分为原位增强复合材料和非原位增强复合材料。原位增强复合材料是指增强体通过正常的冶金反应、结晶反应、塑性变形等加工工艺自然形成的一类复合材料,如定向凝固生长 Cr 纤维增强 Cu 基复合材料、原位形变复合 Fe 纤维增强 Cu 基复合材料、原位反应合成  $TiB_2$  颗粒增强 Cu 基复合材料等。非原位复合材料是指增强体为外加的,且在制造过程中保持形态和晶体结构基本不变的一类复合材料,如高压开关用粉末冶金 50% \* Cr 颗粒增强 Cu 基复合材料、高速列车导电滑弓用石墨/Cu 复合材料。

### 4) 按照基体分类

按照其基体材料的性质通常分成两类:金属基复合材料(metal matrix composites, MMCs)和非金属基复合材料。金属基复合材料包括铝基、镁基、铜基、钛基、高温合金基、金属间化合物基和难熔金属基复合材料。非金属基复合材料又可以分为两类:高分子基复合材料和陶瓷基复合材料。

### 5) 按照增强体和基体材料的性质分类

按照增强体和基体材料的金属和非金属性质,又可将复合材料归纳为:非金属增强体与非金属基体复合、非金属增强体与金属基体复合、金属增强体与非金属基体复合、金属增强体与金属基体复合四类。此外,增强体也可能由金属与非金属混杂于非金属基体中。

## 3. 复合材料的命名<sup>[2]</sup>

复合材料的命名国内外没有统一的规定,最常用的是根据增强材料和基体材料的名称来命名,有三种情况:

(1) 以基体材料为主命名,如金属基复合材料、聚合物基复合材料、陶瓷基复合材料。

(2) 以增强材料为主命名,如碳纤维增强复合材料、氧化铝纤维增强复合材料。

(3) 基体与增强材料并用。这种命名方法一般是将增强材料名称放在前面,

\* 无特殊说明,本书所指含量均为质量分数。

基体材料名称放在后面,最后加“复合材料”。例如,碳纤维增强铝合金基复合材料常写成“C<sub>f</sub>/Al 复合材料”,氧化铝颗粒增强铝合金基复合材料常写成“Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>/Al 复合材料”(f—纤维,p—颗粒)。

#### 4. 复合材料的特性<sup>[2]</sup>

##### 1) 复合材料的性能特点

人们使用材料总是希望其既具有较高的强度,又有较好的塑性。强度高意味着承载能力强,可以相应减少构件横截面积,节省材料,而良好的塑性则能够防止材料的突然破坏。但是金属材料的强度与塑性很难同步大幅度提高,无机非金属(玻璃、陶瓷)刚而不柔,有机聚合物(树脂、橡胶等)则柔而不刚,而复合材料是将刚性较大的增强材料与塑性较好的基体结合起来,刚柔并济,具有良好的综合性能。

##### (1) 高比强度、高比模量。

比强度和比模量分别是材料的抗拉强度和弹性模量与其密度之比,它们是度量材料承载能力的两个重要指标。表 1.1 列出了几种复合材料与金属的比强度和比模量数值对比,可以看出,纤维增强复合材料的比强度和比模量是各类材料中最高的。据计算,用复合材料制成与高强度钢具有相同强度和刚度的零件时,其质量可以减轻 70% 左右,这对高速运转的结构零件或要求减轻质量的运输工具和工程构件等具有十分重大的意义。

表 1.1 复合材料与金属材料的比强度、比模量对比<sup>[2]</sup>

材料	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	比强度/0.1m	比模量/10 <sup>2</sup> m
钢	7.8	1030	2100	0.13	0.27
铝	2.8	470	750	0.17	0.26
钛	4.5	960	1140	0.21	0.25
玻璃纤维增强树脂基 复合材料	2.0	1060	400	0.53	0.21
高强度碳纤维/环氧	1.45	1500	1400	1.03	0.97
高模量碳纤维/环氧	1.60	1070	2400	0.67	1.5

##### (2) 抗疲劳性能良好。

金属材料的疲劳破坏,一般都是材料内部损伤积累造成的。裂纹发展至一定程度,迅速扩展而造成的突然断裂(裂纹的扩展方向不变),通常事先没有预兆,常导致重大事故甚至灾难。而纤维复合材料中的初始缺陷(如断裂的纤维、基体开裂、纤维脱胶等)大大超过普通金属,因而对缺口、孔等引起应力集中的敏感性要比金属小得多,特别是纤维和基体界面能改变裂纹扩展方向,从而在一定程度上阻止了裂纹的扩展。其疲劳破坏过程总是从纤维的薄弱环节开始,逐渐扩展到结合面上,破坏前有明显的征兆。大多数金属的疲劳极限是其抗拉强度的 40%~50%,

而碳纤维复合材料则可以高达70%~80%。

(3) 减摩耐磨、自润滑性能优良。

某些塑料(如尼龙、聚四氟乙烯等)或无机材料(如石墨、二硫化钼等)具有良好的减摩、自润滑特性,以其作为基体或增强体制备的复合材料同样具有类似的优良减摩、自润滑特性。例如,塑料复合钢板可用做轴承材料,复合钢板兼有钢的强度及某些塑料(如尼龙、聚四氟乙烯)的耐磨性、尺寸稳定性和高的PV极限值,从而能使轴承寿命显著提高;将石棉与塑料复合,则可得到摩擦系数大、制动效果好的摩擦材料,可制造刹车盘片等;石墨/Cu复合材料具有高导电、导热、耐磨、减摩等特性,现广泛应用于电气列车导电滑板等。

(4) 破损安全性能良好。

纤维增强复合材料基体中平均每平方厘米面积上的纤维至少有几千根,多至几万根(直径一般为10~100 $\mu\text{m}$ ),使用中超载时即使少量纤维断裂,其载荷会迅速重新分配到未破坏的纤维上,这样在短时间内不致使整个构件失去承载能力。

(5) 化学稳定性较高。

聚合物和陶瓷往往具有较高的化学稳定性,因而纤维增强聚合物基复合材料,以及陶瓷基复合材料通常也具有较高的化学稳定性。

(6) 其他特殊性能。

某些复合材料具有优良的耐高温性、隔热性、抗烧蚀性及特殊的电、光、磁等性能。此外复合材料适合于整体成形,具有良好的工艺性能。

目前,纤维增强复合材料存在的主要问题是:抗冲击性能低,横向强度和层间剪切强度差及成本较高等。颗粒增强复合材料存在界面润湿性、界面反应、颗粒增强体均匀添加困难、制备工艺复杂等问题。值得指出的是,纤维增强复合材料通常具有很强的方向性,是一种各向异性的非均质材料,与各向同性的均质金属材料有很大差别,对此在设计和使用时应予以高度重视。

## 2) 复合材料的设计及制造技术特点

复合材料的设计及其制造技术完全不同于传统的金属材料,具有两个基本特点:

(1) 力学性能的可设计性。

在构件的设计和制造时可按其受力情况和性能要求设计复合材料的性能,而不仅仅是传统设计的材料的选择。

(2) 材料制造和构件制造的统一性。

对纤维增强聚合物基复合材料、陶瓷基复合材料等而言,由于制备工艺复杂,其由原材料制造复合材料的过程,同时也是制造复合材料构件的过程。上述特点使制造复合材料构件或制品的过程同时包含着材料、设计和制造不可分割的三个方面,而多数颗粒增强金属基复合材料可进行各种冷、热加工成形和后续机械加工。



## 5. 复合材料的界面与强度

选用性能良好的增强材料和基体材料制备的复合材料,其性能却不一定令人满意,这是因为不是任何材料都能相互复合,复合需要满足一定的要求。例如,纤维增强聚合物的复合主要与三个因素有关:纤维与基体本身的性质及含量,二者的界面结合强度和纤维在基体中的排列方式等。

### 1) 复合材料对增强体和基体的要求

(1) 增强体的强度和弹性模量要求高。

复合材料的增强效果主要取决于增强材料,而基体是起支持、保护及应力传递作用,这样即使个别纤维产生裂缝甚至断裂,由于基体对纤维的黏合力,也能使复合材料有足够的强韧性。

(2) 增强体与基体能相互润湿。

(3) 增强体与基体材料的热膨胀系数要匹配。

(4) 基体与增强体之间不发生使性能降低的界面化学反应。

(5) 增强体与基体材料界面间有足够的结合强度。

(6) 增强体与基体的相对含量要适当。

### 2) 界面结合强度

复合材料除力学性能主要取决于增强体外,其他各种性能几乎都取决于基体或基体与增强体的界面,所以增强体与基体之间必须牢固结合,只有这样,基体承受的应力才能传递到增强体上,以发挥其增强作用。当然界面结合强度过大,则断裂过程中就没有增强体(如纤维)从基体中拔出的过程,导致整个复合材料呈脆性断裂。所以增强体与基体之间要有适当的结合强度。

界面结合强度主要与增强材料的表面化学组成、界面结构与性质有很大的关系。

## 1.1.2 金属基复合材料设计原则<sup>[1]</sup>

### 1. 基体材料的选择

金属基体在复合材料中所起的主要作用如下:

(1) 固结增强体,与增强体一起构成复合材料整体,保护增强体使之不受环境侵蚀。

(2) 传递和承受载荷,在颗粒增强金属基复合材料中,基体是主要承载相,在纤维增强金属基复合材料中,基体对力学性能的贡献也远大于聚合物基体和陶瓷基体在复合材料中的贡献。

(3) 赋予复合材料一定形状,保证复合材料具有一定的可加工性。

(4) 复合材料的强度、刚度、密度、耐高温、耐介质、导电、导热等性能均与基体