



碳化钨颗粒增强钢铁基 表层复合材料

—— 李祖来 蒋业华 卢德宏◎著 ——



科学出版社

碳化钨颗粒增强钢铁基 表层复合材料

李祖来 蒋业华 卢德宏 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍金属先进凝固成形及装备技术国家地方联合工程实验室研究的碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的制备方法和组织性能。本书共 8 章,第 1 章概述国内外金属基复合材料特别是颗粒增强钢铁基表层复合材料的研究现状、发展趋势及面临的主要问题;第 2 章从基体选择、增强颗粒选择及二者之间相容性和润湿性的角度论述颗粒增强钢铁基表层复合材料的组织及结构设计;第 3 章详细论述铸渗法制备碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的工艺流程;第 4 章论述各类不同基体及添加元素后碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的组织;第 5 章论述碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的界面、界面反应控制等相关界面理论;第 6 章论述碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的相关力学性能;第 7 章论述碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的各类磨损实验过程及磨损性能;第 8 章论述目前碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料在个别领域的应用。

本书适合耐磨材料及复合材料领域的工程技术人员和经营管理人员阅读,也可供材料类及相关专业的高校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料 / 李祖来, 蒋业华, 卢德宏著.
—北京: 科学出版社, 2017
ISBN 978-7-03-052644-1

I. ①碳… II. ①李… ②蒋… ③卢… III. ①碳化钨—颗粒强化—钢—金属基复合材料 ②碳化钨—颗粒强化—铁—金属基复合材料 IV. ①TB331

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 077382 号

责任编辑: 陈雅娴 / 责任校对: 何艳萍
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 16

字数: 329 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

《中国制造 2025》重点领域技术路线图的发布，对我国制造业转型升级和跨越式发展作了整体部署，特别是为新材料领域描绘了蓝图，指明了方向。复合材料作为现代材料的一个重要分支及研究方向，其发展的工业水平已经成为衡量一个国家或地区科技与经济实力的标志之一。陶瓷颗粒增强金属基复合材料是一种应用较广泛的复合材料，其兼有金属的韧性和陶瓷颗粒的强度，这一优点使其备受青睐，未来在航空航天、军事工业、电子仪表、汽车制造等领域有着巨大的应用前景。

目前碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料总体上还停留在实验研究阶段，将其产业化、批量化生产是将来的发展目标和方向。本书重点介绍碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的组织和结构设计、制备方法及界面理论等，并探讨其力学性能规律和磨损性能规律，同时列举了几项目前碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的实际应用，并展望其未来在工业领域上的应用。本书填补了国内关于碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料基础理论研究相关书籍的空白，对于推进其走上产业化之路乃至整个金属基复合材料的蓬勃发展都有着举足轻重的作用。随着现代科学技术的不断发展，制备方法不断完善创新，碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料有望突破瓶颈，得到进一步发展。

本书实验部分主要依托金属先进凝固成形及装备技术国家地方联合工程实验室，内容涉及碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料设计、界面的相关基础知识、制造方法、应用、性能及其表征与测试技术等，为耐磨行业领域积累了大量宝贵的经验。

参加本书编写的有昆明理工大学李祖来、蒋业华和卢德宏，其中李祖来编写第 1、3、4、7 章，蒋业华编写第 2、6 章，卢德宏编写第 5、8 章。

在本书编写过程中得到了昆明理工大学有关领导和同事的大力支持和帮助，书中引用了相关领域部分文献和手册，同时参考了兄弟院校和其他优秀科研单位的经验。在此谨对上述人员和有关文献、手册作者一并表示衷心的感谢。

由于作者的理论水平和编写经验有限，加之时间仓促，书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2017 年 1 月

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	复合材料的定义及分类	2
1.1.1	复合材料的定义	2
1.1.2	复合材料的分类	3
1.1.3	金属基复合材料的分类	7
1.2	金属基复合材料的制备工艺及应用现状	8
1.2.1	金属基复合材料的制备工艺	8
1.2.2	金属基复合材料的应用及性能	14
1.2.3	颗粒增强金属基复合材料的研究现状	19
1.3	颗粒增强金属基表层复合材料的研究及应用现状	25
1.3.1	表层复合材料的定义	25
1.3.2	表层复合材料的制备方法	26
1.3.3	表层复合材料的研究现状	34
1.3.4	表层复合材料的应用现状	35
1.4	颗粒增强钢铁基表层复合材料的研究现状	36
1.4.1	颗粒增强表层复合材料的分类	36
1.4.2	氧化铝颗粒增强钢铁基表层复合材料的研究现状	37
1.4.3	碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的研究现状	37
1.4.4	其他陶瓷颗粒增强钢铁基表层复合材料的研究现状	39
1.5	颗粒增强金属基表层复合材料的研究趋势与展望	39
1.5.1	存在的主要问题	39
1.5.2	最新研究进展与发展趋势	40
1.5.3	产业化过程中急需解决的关键技术	43
第 2 章	颗粒增强钢铁基表层复合材料的组织及结构设计	49
2.1	结构设计	49
2.2	基体与增强体的润湿性和相容性	51
2.2.1	基体与增强体的润湿性	51
2.2.2	基体与增强体的相容性	52
2.3	基体选择	53

2.3.1	基本原则	54
2.3.2	基材选择	54
2.3.3	基体选择原则	55
2.4	增强颗粒选择	57
2.4.1	基本原则	57
2.4.2	颗粒大小	58
2.4.3	颗粒形状	61
2.4.4	颗粒体积分数	61
2.4.5	增强体的表面处理方法	64
第3章	铸渗法制备碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料	69
3.1	复合材料的结构设计和组织设计	69
3.2	铸渗法制备碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料工艺流程	70
3.2.1	基材、基体及增强颗粒的选择	70
3.2.2	铸渗法制备碳化钨颗粒增强铁基表层复合材料	74
3.2.3	铸渗法制备碳化钨颗粒增强钢基表层复合材料	79
3.3	表层复合材料的表面质量及尺寸精度研究	80
3.3.1	工艺参数对涂覆预制块法制备复合材料表面形貌的影响	81
3.3.2	预置方法对复合材料表面质量的影响	84
3.3.3	表层复合材料的尺寸精度	86
第4章	碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的组织	90
4.1	涂覆预制块法制备的铁基表层复合材料的组织	90
4.1.1	不同碳化钨颗粒体积分数的复合层组织	90
4.1.2	表层复合材料的物相分析	93
4.1.3	表层复合材料的复合层组织	94
4.1.4	表层复合材料的基材区和过渡区显微组织	96
4.2	压制预制块法制备的铁基表层复合材料的组织	98
4.2.1	表层复合材料的复合层组织	98
4.2.2	表层复合材料的过渡层组织	100
4.3	碳化钨颗粒增强高铬钢基表层复合材料的组织	100
4.3.1	复合层物相分析	101
4.3.2	不同碳化钨颗粒质量分数复合层显微组织	101
4.3.3	表层复合材料过渡层显微组织	104
4.4	元素添加对表层复合材料基体组织的影响	107
4.4.1	Cr 对灰铸铁基表层复合材料基体组织的影响	107
4.4.2	Co 对灰铸铁基表层复合材料基体组织的影响	112

4.4.3	Ni 对高铬钢基表层复合材料基体组织的影响	115
4.4.4	Mo 对高铬钢基表层复合材料基体组织的影响	120
4.4.5	未添加合金粉末的碳化钨/高铬钢基表层复合材料的组织	124
第 5 章	碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的界面和界面反应控制	127
5.1	界面的基本概念	128
5.1.1	界面的定义	128
5.1.2	界面效应	128
5.1.3	界面结合类型	129
5.2	金属基复合材料的界面	130
5.2.1	金属基复合材料的界面特点	130
5.2.2	界面模型	130
5.2.3	界面微观结构	131
5.2.4	界面稳定性	133
5.3	金属基复合材料的界面反应控制	134
5.3.1	界面反应与界面结合强度	134
5.3.2	金属基复合材料的界面反应控制途径	135
5.4	金属基复合材料的界面设计	136
5.5	碳化钨颗粒增强铁基表层复合材料的界面特性	138
5.5.1	增强颗粒与基体间界面测试方法	138
5.5.2	预制块为碳化钨、高碳铬铁时增强体与基体的界面	139
5.5.3	预制块为碳化钨时增强体与基体的界面	147
5.5.4	高碳铬铁为基体时增强体与基体的界面	151
5.5.5	碳化钨颗粒在基体中的熔解和溶解	152
5.6	碳化钨颗粒增强钢基表层复合材料的界面	156
5.6.1	增强颗粒和基体间界面	156
5.6.2	基材与复合层间的界面	157
第 6 章	碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的力学性能	160
6.1	材料力学性能概述	160
6.2	V-EPC 制备碳化钨/铁基表层复合材料的硬度	161
6.2.1	表层复合材料的宏观硬度	161
6.2.2	表层复合材料的微观硬度	163
6.3	不同预制块制备的表层复合材料显微硬度特性	164
6.3.1	含镍预制块制备钢基表层复合材料的硬度	164
6.3.2	含钨预制块制备钢基表层复合材料的硬度	165
6.3.3	含钼预制块制备钢基表层复合材料的硬度	167

第 7 章	碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的磨损性能	169
7.1	材料磨损简介	169
7.1.1	磨损产生的原因	169
7.1.2	材料磨损对材料的影响	169
7.1.3	磨损分类	170
7.1.4	表征材料磨损性能的参量	170
7.2	碳化钨颗粒增强铁基表层复合材料的冲蚀磨损性能	171
7.2.1	冲蚀磨损性能研究意义	171
7.2.2	冲蚀磨损工况下的磨损机制	171
7.2.3	影响冲蚀磨损的因素	173
7.2.4	浆体冲蚀磨损	174
7.2.5	浆体性质及靶材对冲蚀磨损的影响	176
7.2.6	冲蚀磨损工况对工件材质的要求	176
7.2.7	碳化钨颗粒增强铁基表层复合材料的冲蚀磨损性能	179
7.3	碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的冲击磨料磨损性能	188
7.3.1	冲击磨料磨损测试方法	188
7.3.2	Cr 对铁基表层复合材料冲击磨料磨损性能的影响	190
7.3.3	Co 对铁基表层复合材料冲击磨料磨损性能的影响	191
7.3.4	Cr、Co 元素对表层复合材料冲击磨料磨损的影响机制	192
7.3.5	合金元素对钢基表层复合材料冲击磨料磨损的影响	195
7.4	碳化钨颗粒增强钢基表层复合材料的高温摩擦磨损性能	203
7.4.1	摩擦磨损实验	203
7.4.2	载荷对摩擦磨损性能影响	206
7.4.3	滑动速度对摩擦磨损性能影响	207
7.4.4	体积分数对摩擦磨损性能影响	208
7.4.5	温度对摩擦磨损性能影响	209
7.4.6	高温摩擦磨损机理	210
7.5	碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的三体磨料磨损性能	213
7.5.1	实验机的重现性实验及三体磨料磨损的实验方法	214
7.5.2	不同碳化钨体积分数复合材料的三体磨料磨损性能	216
7.5.3	不同载荷下复合材料的三体磨料磨损性能	218
7.5.4	不同磨损时间下复合材料的三体磨料磨损性能	219
7.5.5	表层复合材料的三体磨料磨损机理	220
第 8 章	碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料的应用	223
8.1	耐磨材料的研究意义与价值	223

8.2 碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合材料制备工艺技术.....	223
8.2.1 碳化钨颗粒增强钢铁基表层复合耐磨回转体零件开发	224
8.2.2 碳化钨颗粒增强钢铁基局部复合杂质泵过流部件开发	228
参考文献	236

第 1 章 绪 论

材料的复合是材料发展的必然趋势之一，采用两种以上异形、异性、异质的材料通过复合的途径形成复合材料，这样可以借助各组成材料特性的互补作用使复合材料具有优异的性能。这个规律早已在自然界物体的演化过程中体现出来。目前存在于自然界的天然材料，如木、竹、骨骼、贝壳等几乎无一例外属于复合材料。例如，木材是由木纤维和木质基体复合而成的，从而兼具强和韧的特性。人类从上古时期就掌握了这一规律。例如，用草茎和泥土复合，利用草茎的强度和泥土的黏结作为建造居住的窝棚材料。我国 4000 多年前的夏商时期已经开始使用的麻丝和大漆器也是一种典型的复合材料，而且工艺一直延续至今。

复合材料开始进入工业生产是在 18 世纪末期，由于工业发展的需要，出现了用面线增强橡胶制造的轮胎和胶布，以及用天然树脂和云母复合成的板材。然而，一般将 20 世纪 40 年代作为现代复合材料发展的起点。当时正值第二次世界大战的末期，由于战争的需要，美国开始用玻璃纤维增强合成树脂的聚合物基复合材料制造军用飞机的雷达罩等部件，有效地提高了作战性能。由于发展了高性能的增强体如碳纤维、芳酰胺纤维及一些无机纤维，同时提高了一些树脂基体的耐热性能，构成了所谓的“先进复合材料”，使之在比强度、比刚度和耐热性能上具有绝对优势，加上当前新发展出来的碳/碳复合材料和金属基及陶瓷基复合材料，使其具有其他材料无法替代的性能。这样复合材料就成了航空、航天工业的首要材料，被列入当时各发达国家规划的重点内容。我国对复合材料同样给予了高度重视，体现在各种规划内容和国家项目中。尽管复合材料已经占有了一定市场份额，但是它具有根本性的不利因素，如成本高(原材料昂贵、加工工艺较为复杂)、可靠性不够成熟(组分多、工艺环节多带来的不确定因素)等，使之与传统的金属和聚合物材料间的竞争处于被动地位。经过逐步调整，复合材料的可设计性和高性能优势使其成为发展较快的材料。

由于工业的发展，越来越多的零部件需要在复合磨损工况下使用，且部分零部件还需面对高温环境中的热作用影响。这不仅要求材料具有较高的抗磨性，还需要材料具备耐高温性能，保证其安全使用。例如，在冶金领域中，轧制钢坯的轧辊受到坯料金属挤压与摩擦的同时，又受到炙热钢坯的热作用，且在其升温后还需进行迅速喷淋冷却，这种激冷激热工况所引起的热冲击作用对材料的抗热疲劳性能提出了更高的要求。在该应用领域中，现主要以高镍合金作为应用主体，而此类材料虽能满足在激冷激热工况下的工作要求，但耐磨性不高的缺点造成其使用寿命有限，

零件更换频繁，耗费大量的人力和物力，不符合节能减排的要求。因此，传统金属材料已难以满足如此严苛条件下的生产需要，而具有优越性能的先进复合材料有望在这些工业领域得到更多的应用。复合材料也是材料研发的一个重要方向，如复合材料的设计、制备加工、高效利用、安全服役、低成本循环再利用等关键技术已成为国家科技发展“十三五”规划的重点领域，其相关研究将为提高关键材料的供给能力，抢占新材料应用技术和高端制造制高点提供重要支持。

1.1 复合材料的定义及分类

随着现代科技的发展，特别是近几十年来航天航空和先进武器系统的发展，单一的金属、陶瓷、高分子等工程材料均难以满足各关键零部件对材料性能的要求。为克服单一材料性能上的局限性，充分发挥各种材料的特性，弥补其不足，复合材料便应运而生。复合材料的出现是金属、陶瓷、高分子等单质材料发展和利用的必然结果，是各种单质材料研制和使用经验的综合，也是单质材料技术的升华。复合材料的兴起极大地丰富了现代材料的家族，为人类社会的发展开辟了无限的想象和实现空间，也为材料类学科的持续发展注入了强大的生机和活力。

1.1.1 复合材料的定义

“复合材料”(composite materials)一词大约出现在 20 世纪 50 年代，随之出现了对复合材料较为严格的定义。根据《材料大辞典》，复合材料的定义叙述为：“复合材料是由有机高分子、无机非金属或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料，它既能保留原组分材料的主要特色，又通过复合效应获得原组分所不具备的性能。可以通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联，从而获得新的优越性能，与一般材料的简单混合有本质的区别。”由此可以看出，复合材料通过对原材料的选择、各组分分布的设计和工艺条件的保证等，使原组分材料的优点互相补充，同时利用复合材料的复合效应使之性能得到大幅度提高，最大限度地发挥其优势。

复合材料包括广义的复合材料和现代意义上的复合材料。复合材料是由两种或两种以上的材料经过复合工艺而制备的多相材料。因此在广义上，由两类组织性能不同的材料组合在一起，并具备一定的使用性能且优于原材料的具有复合结构的材料均可称为复合材料。例如，日常生活中所熟悉的钢筋混凝土结构复合材料，充分运用了混凝土机体承载性能好、硬度高和钢筋相高韧性、良好的弹性模量和抗拉伸的特性，并且原料来源广泛，易加工处理，而被广泛应用于日常生活中。另外，混凝土本身就是一种复合材料，混凝土中包含粗骨料、细骨料，还有浆体作为黏结剂，混凝土的复合结构克服了大块石料不宜搬运和取用、泥浆硬

度不够的缺点,使得人类建筑得以蓬勃发展。混凝土是人类文明史中最早使用的一批广义复合材料。

现代意义上的复合材料是指由金属材料、陶瓷材料或高分子材料等两种或两种以上的材料经过复合工艺制备的多相材料,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以满足各种不同的要求。复合材料结构中的连续相称为基体,其他相被基体所包容,称为增强体。例如,某复合材料因增强体的加入,其表面硬度大幅提升,表现出良好的抗磨性能,基体又为复合材料提供了较好的韧性,整体表现出较好的使用性能。基体材料分为金属和非金属两大类,金属基体常用的有钢铁、铝、镁、铜、钛及其合金等,非金属基体主要有合成树脂、石墨、橡胶、陶瓷、碳等。增强材料主要有玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、芳纶纤维、石棉纤维、碳化硅纤维、晶须、金属丝和硬质细粒等。复合材料的诞生和发展是现代科学技术不断进步的结果,也是材料设计方面的一个突破。

现代意义上的复合材料需要满足三个基本要求:①各组元含量符合要求;②复合材料的性能显著不同于各组元的性能;③通过各种方法混合而成。对于复合材料,应该强调正面效应,即复合后的整体性能应超过组分材料性能,同时保留所期望的性能(如高强度、高刚度、质量轻),抑制所不期望的特性(如延展性低、易腐蚀等)。也就是说,并不是随意将不同种类原料混合在一起都能够得到复合材料。

现代意义上的复合材料应具有的特性有:①从复合材料的组成成分和相对含量上来说,现代意义的复合材料是由人工选择和设计的,即复合材料具有可设计性;②组成复合材料的某些组分在复合后仍然保持其固有的物理和化学性质(区别于化合物和合金);③复合材料不仅能保持原组分的部分优点,而且能产生原组分所不具备的新性能,可最大限度地发挥各类原材料组元的特性,并赋予单一材料组元所不具备的优良、特殊性能;④复合材料具有新的、独特的、可用的、单个组分材料性能所不及或不同的性能;⑤复合材料各组元之间有明显的界面;⑥复合材料是非天然形成的,以区别于具有某些复合材料形态特征天然物质。

总之,现代意义上的复合材料通常是在不同尺度、不同层次上结构设计、结构优化的结果,融会贯通了各种单质材料发展的最新成果,甚至产生了原单质材料根本不具备的全新的高性能与新功能。这种高性能和新功能的出现主要源于复杂的复合效应、界面效应、不同层次的尺度效应等,它们构成现代复合材料科学的基础、研究热点和发展方向。

1.1.2 复合材料的分类

从近代开始,由于人类主动认知和研究,制备出了种类繁多、具备不同用途的复合材料,而且新的复合材料不断涌现,复合材料科学的发展突飞猛进。截至目前,已经形成细分种类繁多、功能齐全、性能优异、应用范围广泛的复合材料体系。

1. 按基体材料分类

根据不同的划分依据,复合材料可以分为不同的材料类别,其基本的科学划分依据包括按基体材料分类、按增强体材料分类、按增强体材料形态分类、按用途分类。复合材料按照基体材料分类,主要是依据基体材料所在的材料类别分类,包括聚合物基、无机非金属基、金属基三大类别。

1) 聚合物基复合材料

以有机聚合物(主要为热固性树脂、热塑性树脂及橡胶)为基体制备的复合材料为聚合物基复合材料。按照增强体的特性可分为:①玻璃纤维增强树脂基复合材料;②天然纤维增强树脂基复合材料;③碳纤维增强树脂基复合材料;④芳纶纤维增强树脂基复合材料;⑤金属纤维增强树脂基复合材料;⑥特种纤维增强聚合物基复合材料;⑦陶瓷颗粒增强树脂基复合材料;⑧热塑性树脂基复合材料[聚乙烯、聚丙烯、尼龙、聚苯硫醚(PPS)、聚醚醚酮(PEEK)、聚醚酮酮(PEKK)];⑨热固性树脂基复合材料[环氧树脂、聚酰亚胺、聚双马来酰亚胺(PBMI)、不饱和聚酯等];⑩聚合物基纳米复合材料。

聚合物基复合材料是最先制备并使用的一批复合材料,目前在建筑业、化学工业、交通运输、机械电器、电子工业及医疗、国防等领域都得到了广泛应用。自从先进聚合物基复合材料投入应用以来,有三件值得一提的成果。第一件是美国全部用碳纤维复合材料制成一架八座商用飞机里尔芳 2100 号,并试飞成功,这架飞机仅 567kg,以结构小巧、质量轻而称奇于世。第二件是采用大量先进聚合物基复合材料制成的哥伦比亚号航天飞机,这架航天飞机用碳纤维/环氧树脂制作,长 18.2m、宽 4.6m 的主货舱门,用凯芙拉纤维/环氧树脂制造各种压力容器,用硼/铝复合材料制造主机身隔框和翼梁,用碳/碳复合材料制造发动机的喷管和喉衬,发动机组的传力架全由硼纤维增强钛合金复合材料制成,被覆在整个机身上的防热瓦片是耐高温的陶瓷基复合材料,在这架代表近代最尖端技术成果的航天飞机上同时使用了树脂、金属和陶瓷基复合材料。第三件是在波音-767 大型客机上使用了先进聚合物基复合材料作为主承力结构,这架大型客运飞机使用碳纤维、有机纤维、玻璃纤维增强树脂及各种混杂纤维的复合材料制造了机翼前缘、压力容器、引擎罩等构件,不仅使飞机结构质量减轻,还提高了飞机的各种飞行性能。先进聚合物基复合材料的研究应用主要集中于国防工业,高性能聚合物基复合材料主要是碳纤维和芳纶纤维增强环氧树脂、多官能团环氧树脂和 BMI。一批高性能的热塑性聚合物基复合材料,如 PEEK、PECK、PPS 等正在从实验室走向应用。

2) 无机非金属基复合材料

无机非金属基复合材料是以无机非金属材料为基体,以连续纤维、短纤维和颗粒为增强体制成的复合材料。无机非金属基复合材料按其材料性能和制造特点分为两大类。

(1)陶瓷基复合材料。陶瓷具有高强度、高模量、高硬度、耐磨损、耐高温、耐腐蚀、抗氧化、热膨胀系数小、尺寸稳定等优点,但其致命弱点是脆性大,加入增强材料后,可以在保留原有特点的基础上获得韧性较高的陶瓷基复合材料。陶瓷基复合材料是一种以陶瓷、玻璃、碳为基体的复合材料,具体包括:①高温陶瓷基复合材料;②玻璃陶瓷基复合材料;③碳/碳复合材料。不论是高温陶瓷基复合材料还是玻璃陶瓷基复合材料,都比金属基复合材料和聚合物基复合材料有较高的耐热性。陶瓷基复合材料主要应用于高温结构部件,是航空发动机涡轮叶片、涡轮盘、燃烧室、固体火箭发动机燃烧室、喷管等的理想材料。

玻璃陶瓷基复合材料又称微晶玻璃基复合材料,是以玻璃陶瓷为基体,以纤维、晶须或晶片状的陶瓷、碳、金属等为增强体,通过复合工艺所构成的复合材料。该复合材料的基本材料主要有锂铝硅微晶玻璃(LAS, $1000\sim 1200^{\circ}\text{C}$)、镁铝硅微晶玻璃(MAS, 1200°C)、钡镁铝硅微晶玻璃(1250°C)、四元莫来石(约 1500°C)和六方钡长石(约 1700°C)等。玻璃陶瓷基复合材料的力学性能特别是韧性比原基体材料有较大的提高。例如,用连续纤维增强玻璃陶瓷其强度范围为 $700\sim 1000\text{MPa}$,而原基体材料的强度范围为 $70\sim 150\text{MPa}$,断裂功为 $2\sim 4\text{J/m}^2$,断裂韧性为 $1\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。可以制造小型雷达天线罩、复合装甲、耐磨蚀化学品容器、生物医药容器和耐热部件等。

碳/碳复合材料的比强度、比模量高,高温下仍具有高的强度、良好的耐烧蚀性、摩擦性和抗热振动性,是一种最有发展前途的热结构材料,还是一种极好的耐烧蚀材料。碳/碳复合材料目前主要应用于战略导弹端头结构和作为固体火箭发动机喷嘴的结构材料,还用于洲际导弹的端头、火箭发动机喷管、高温结构部件和飞机刹车盘等。

(2)无机黏结剂基复合材料。无机黏结剂基复合材料是以石膏、水泥和氯氧镁黏结剂为基体,以无机纤维和有机纤维为增强材料制成的复合材料。无机黏结剂基复合材料的共同特点是防火、耐热和价格低廉等。最常见的有玻璃纤维增强水泥、玻璃纤维或纸纤维增强石膏、玻璃纤维增强氯氧镁复合材料等。具体包括:①水泥基复合材料。水泥基复合材料是以普通水泥为黏结剂、以玻璃纤维和有机纤维为增强材料而制成的复合材料。最早的水泥基复合材料是以石棉纤维为增强材料,进入20世纪60年代后,英国成功研制了抗碱玻璃纤维,使玻璃纤维增强水泥复合材料进入了一个新的发展时期。玻璃纤维增强水泥基复合材料(GRC)的密度小、耐水性好,抗弯强度可达 35MPa ,具有抗裂性好、制品成本低等优点,在建筑工业中主要用作隔墙板、复合外样板、复合屋面板、波形瓦及通风管道和农业温室骨架等。②石膏基复合材料。石膏基复合材料是以纸纤维或玻璃纤维和石膏黏结剂经复合、固化而制成的复合材料,其特点是密度小、隔热、防火、能调节周围环境湿度、制造容易、加工方便等,但其缺点是强度低、耐水性差。石膏基复合材料制品主要用

于建筑物的内隔墙板、吊顶、油库和仓库的防火隔断、室内装饰及艺术装修等，如纤维增强石膏板、装饰天花板、挂绕线及罗马柱头等。③氯氧镁基复合材料。氯氧镁基复合材料是以玻璃纤维或有机纤维增强氧化镁、氯化镁黏结剂而制成的复合材料。我国对氯氧镁基复合材料的研究始于20世纪50年代，经过30多年的反复研究，直到20世纪90年代以后才有了突破性进展。武汉理工大学的研究成果使氯氧镁基复合材料抗弯强度达到194MPa，浸水30天的强度保留率仍能达到90%以上，为其在工程中的应用开辟了广阔前景，实现了工业化生产。

3) 金属基复合材料

金属基复合材料是目前应用最广泛的一类复合材料，按照增强体的不同可以划分为许多种类。增强体并非随意选择和使用，需要遵循一定的规律和要求，关于金属基复合材料按照增强体进行相关的划分和特点将在下一节做详细介绍。

2. 按用途分类

复合材料按用途可分为结构复合材料和功能复合材料。目前结构复合材料占绝大多数，而功能复合材料有广阔的发展前途。21世纪将会出现结构复合材料与功能复合材料并重的局面，而且功能复合材料更具有与其他功能材料竞争的优势。结构复合材料主要用作承力和次承力结构，要求它质量轻、强度和刚度高，在某种情况下还要求有膨胀系数小、绝热性能好或耐介质腐蚀等其他性能。

在结构复合材料中主要含有增强体和基体两部分。增强体承受作为结构使用中的各种载荷，而基体则起到黏结增强体的赋形作用，并传递外载荷的应力。目前结构复合材料所使用的基体主要是有机聚合物，也有少量的金属、陶瓷、水泥及炭(石墨)。因此通常就按所用的不同基体来分类，如图1.1所示。此外，结构复合材料还可以增强体的形式来分类，这种分类的形式适用于各种基体的条件下，如图1.2所示。

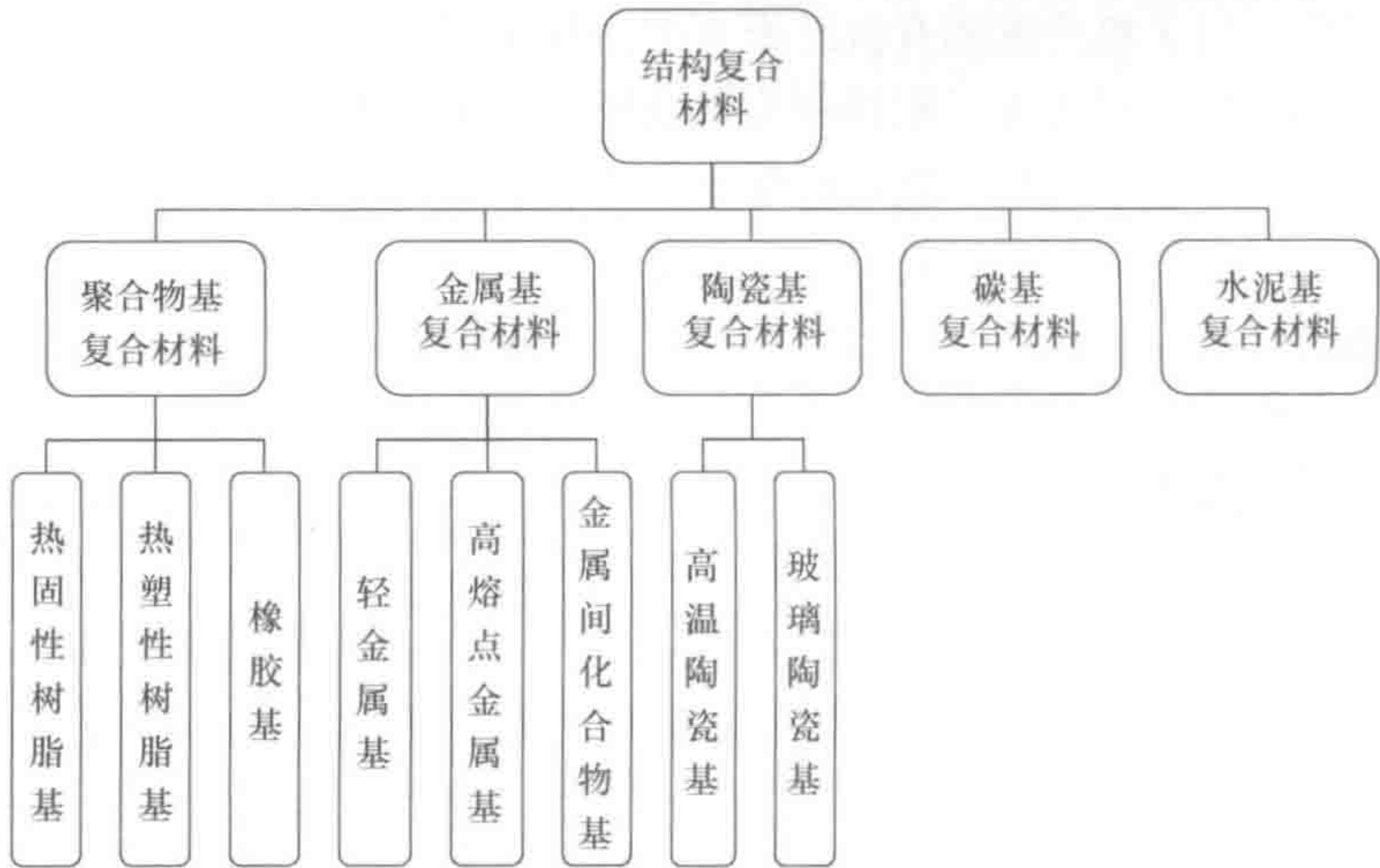


图 1.1 结构复合材料按不同基体的分类

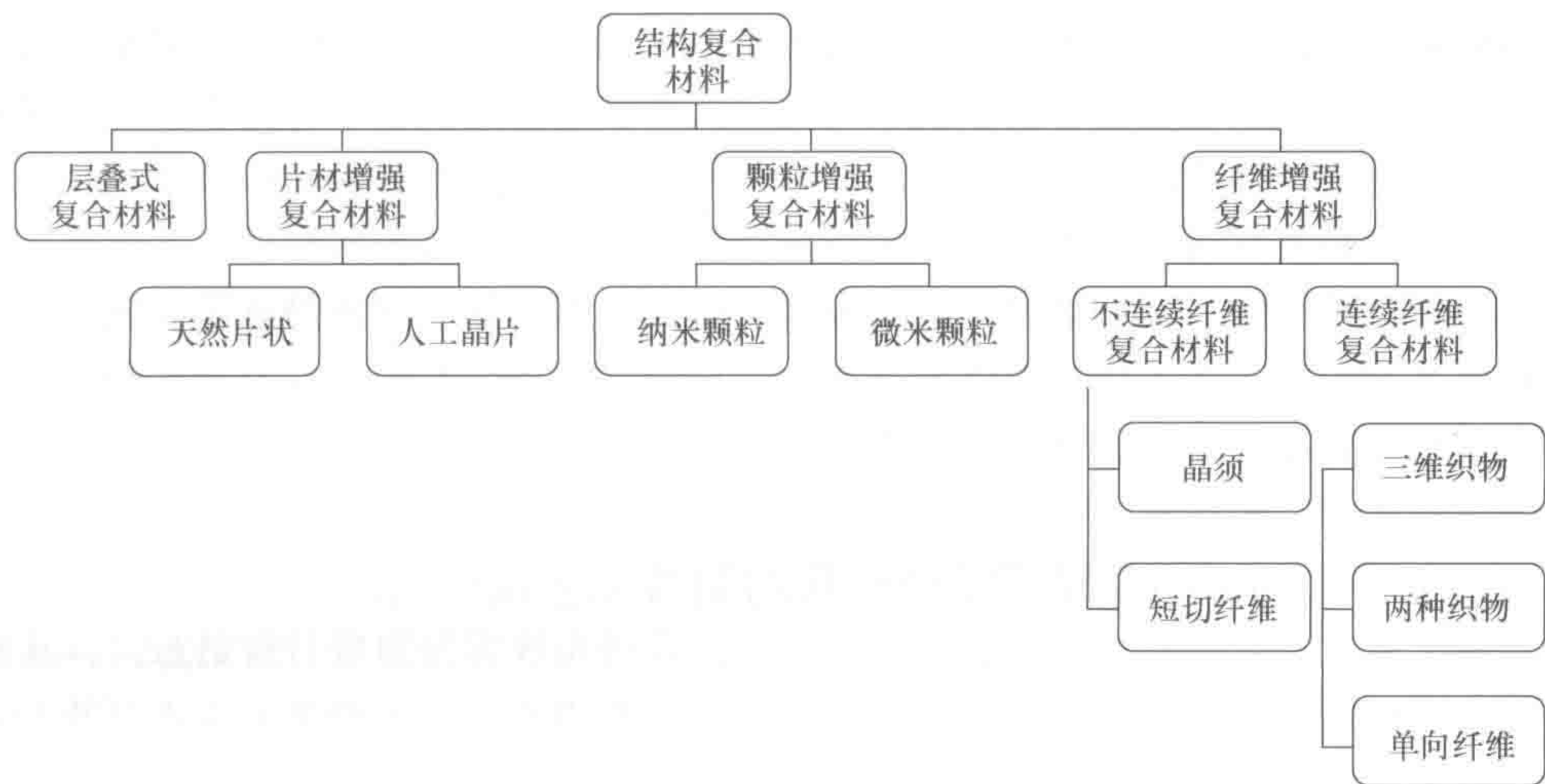


图 1.2 结构复合材料按不同增强体形式的分类

1.1.3 金属基复合材料的分类

金属基复合材料 (metal matrix composite, MMC) 相对较新, 涉及材料表面、界面、相变、凝固、塑性形变、断裂力学等。金属基复合材料是指利用复合技术使多种物理、化学、力学性能不同的金属在界面上实现冶金结合而形成的复合材料, 它极大地改善了单一金属材料的热膨胀性、比强度、断裂韧性、冲击韧性、耐磨损性、电性能、磁性能等。由于同时具有金属或合金基体和增强体的特性, 金属基复合材料具有高比强度、高比模量、良好的导热导电性、耐磨性、耐高温性能、低的膨胀系数、高的尺寸稳定性等优异的综合性能, 被广泛应用于石油、化工、船舶、冶金、矿山、机械制造、电力、水利、交通、环保、压力容器制造、食品、酿造、制药等工业领域。因此, 金属基复合材料得到了飞速的发展, 成为当前国内外材料科学领域的研究热点。

金属基复合材料的增强体包括各种金属、非金属物质, 形态上包括颗粒态、短晶须态、纤维态等。增强体用量不大, 金属材料 and 金属氧化物作为增强体的较多。由于可用的金属材料类别多, 因此金属基复合材料有多种分类方法。

按照金属基体的类别可以将其分为铁基复合材料、镍基复合材料、钛基复合材料、铝基复合材料、高温合金基复合材料、铜基复合材料、镁基复合材料、难熔金属基复合材料及金属间化合物基复合材料等。按照增强体的类别又可将其分为晶须增强复合材料、短纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料及连续纤维增强复合材料。

金属基复合材料的发展经历了金属基整体复合材料和金属基表层复合材料两个阶段, 所以也可大致将金属基复合材料分为这两大类。早在 1947 年, 玻璃纤维增

强金属基复合材料就被用作火箭发动机的壳体材料，之后如硼纤维增强铝基复合材料、硼纤维增强钛基复合材料在航天飞机、火箭、导弹等重要承力部件上实现了工程应用。但此类复合材料的价格极高，只适用于航空、航天等尖端科技领域。由于纤维增强金属基复合材料本身的结构特征，材料的性能呈现各向异性，因此在部分工程领域应用受限。欲保证材料各向同性，晶须、短纤维、颗粒增强等金属基复合材料逐步被研发。由于增强纤维和晶须的价格远高于增强颗粒，在部分工业领域，颗粒增强金属基复合材料显现出巨大的经济优势。

1.2 金属基复合材料的制备工艺及应用现状

从 20 世纪 60 年代起，金属基复合材料已经逐渐成为各国学者和企业关注与研究的热点之一，并已在航空航天、汽车等领域得到了广泛应用。金属基复合材料一般作为耐磨、耐蚀、耐热材料进行开发和应用，它的性能取决于所选用金属或合金的基体和增强体的特性、含量(体积分数)、分布规律等。

1.2.1 金属基复合材料的制备工艺

金属基复合材料作为复合材料研究的一个重要代表，是从 20 世纪 60 年代初发展起来的。国外在研制硼纤维增强体的基础上首先发展了硼/铝复合材料，并取得了成功。另外，由于碳纤维的迅速发展，至 20 世纪 70 年代中期，研究工作主要集中于碳纤维增强铝基复合材料，并用熔融钾钠处理和涂覆两种工艺解决了纤维与铝液的浸润问题。近年来，随着对金属基复合材料及其增强体的研究不断深入，出现了碳化硅单丝粗纤维、束丝纤维、晶须、颗粒和氧化铝长纤维、短纤维等增强铝基的多种金属基复合材料。

由于金属所固有的物理和化学特性，其加工性能没有树脂好，在制造金属基复合材料中还需解决一些关键技术问题，其中主要表现为以下几个方面。

(1) 加工温度高，在高温下易发生不利的化学反应。在加工过程中，为了保持基体的浸润性和流动性，需要采取很高的加工温度(往往接近或高于基体的熔点)。在高温下，基体与增强材料易发生界面反应，有时也会发生氧化生成有害的反应产物。这些反应往往会对增强材料造成伤害，形成过强结合界面。过强结合界面会使材料产生早期低应力破坏。高温下反应产物通常呈脆性，会形成复合材料整体破坏的裂纹源，因此控制复合材料的加工温度是一项关键的技术。

解决方法：尽量缩短高温加工时间，使增强材料与基体界面反应降至最低程度；通过提高工作压力使增强材料与基体浸润速度加快；采用扩散黏结法可有效地控制温度并缩短时间。

(2) 增强材料与基体湿润性太差是金属基复合材料制造的又一难点。绝大多数