

研究生规划教材

高性能 复合材料学

郝元恺 肖加余 编著



化学工业出版社
教材出版中心

研究生规划教材

高性能复合材料学

郝元恺 肖加余 编著

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

高性能复合材料学/郝元恺, 肖加余编著. —北京:
化学工业出版社, 2003.9
研究生规划教材
ISBN 7-5025-4774-6

I. 高… II. ①郝…②肖… III. 复合材料
IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 080908 号

研究生规划教材

高性能复合材料学

郝元恺 肖加余 编著

责任编辑: 杨 菁

文字编辑: 徐雪华

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社
出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 18½ 字数 456 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4774-6/G·1273

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

材料是人类生产和生活的基础物质，是社会进步的重要里程碑和文明程度的标志。新材料是高新技术的基础和先导，又是当代高新技术的重要组成部分，在国民经济建设和国防建设中起着决定性的作用。材料的复合化是材料发展的重要趋势。高性能复合材料（亦称先进复合材料）是影响航天、航空工业等高技术部门发展的关键材料，它的发展水平是衡量一个国家科学技术水平的重要指标，因此其研究和开发普遍受到世界各国的高度重视。高性能复合材料领域的教育和人才培养，对于该类材料的研究、开发和应用及可持续发展起着决定性作用。当今世界发展的主要潮流是和平建设与发展经济。像历史上曾经出现的所有先进材料一样，它们最初都主要服务于军事和当时高新技术的要求，随着经验的积累、生产及使用技艺的提高、使用规模的扩大和价格的降低，它的发展重点必然转移到量大面广的民用产品上来。因此可以预见，高性能复合材料必将成为重要的生产部门和国民经济腾飞的重要增长点。从这个意义上看，本书的出版对于我国在高性能复合材料领域的国际竞争中急起直追也将提供必要的知识与信息。

按照现代科学发展所界定的高性能复合材料，其性能应具有高比强度、高比刚度、高耐热性和高温抗氧化性，还具有高抗疲劳性、高抗蠕变性、高抗摩擦磨损性、高抗烧蚀性、高抗化学腐蚀性、高尺寸稳定性或高电热传导性。按照其在不同使用领域所侧重发挥的主要作用，高性能复合材料分为高性能结构复合材料和高性能功能复合材料。

组成高性能复合材料的主要组分是增强体和基体。本书按照基体材料的不同，将高性能复合材料分为聚合物基体、金属基体和陶瓷基体三类来讨论，系统地介绍了这三类高性能复合材料主要组分材料以及将它们组成复合材料的工艺方法和控制复合材料结构与性能的途径，还介绍了根据不同的复合效应来设计高性能复合材料的原理。

作为复合材料的重要特点之一，复合材料中增强体与基体之间的界面相对复合材料性能具有重要影响。本书集中介绍了聚合物基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料的界面类型、界面作用、界面优化和界面控制的基本理论和基本原理，突出介绍了高性能复合材料界面的最新理论和最新技术。

在保持知识系统性的前提下，为兼顾不同读者的需要，本书的编排结构和内容等方面的独立性强，既便于按先后顺序学习，也便于读者择取急需部分优先阅读。与其他有关复合材料的著作相比较，本书的特色是将作为基体的聚合物、金属和陶瓷材料的组成、性能和加工特点分别与聚合物基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料的制造性能和使用性能结合在一起讨论。这种编排结构有助于学习者从更高的角度理解和掌握高性能复合材料的成型原理、工艺、工艺参数对材料最终性能的影响及控制途径。

高性能复合材料学是国防科学技术大学研究生院重点建设课程。作者根据自身在高性能复合材料二十余年来课程教学和科学研究中的体会，收集了国内外有关高性能复合材料方面的大量资料，编写本书作为教材。本书除可作为材料科学与工程学科硕士研究生教材外，亦可供从事航天、海洋工程、国防工业和热动力机械材料研究和生产的科技人员参考。

本书由国防科学技术大学郝元恺教授和肖加余教授编写。全书由郝元恺教授统一定稿，

由国防科学技术大学唐羽章教授审校。国防科学技术大学胡海峰博士、杨盛良博士、冯坚博士、谢征芳博士和曹英斌博士在本书的编写工作中均做出了较大贡献。

由于作者水平有限，不妥之处请读者指正。

编著者

2003年6月

目 录

1 概论	1
1.1 高性能复合材料的发展史	1
1.1.1 材料发展史	1
1.1.2 复合材料发展史	2
1.2 复合材料的定义和分类	5
1.2.1 复合材料的定义	5
1.2.2 复合材料的结构	6
1.2.3 复合材料的分类	7
1.3 复合材料的基本特点	9
1.3.1 复合材料的性能具有可设计性	9
1.3.2 材料与构件制造的一致性	10
1.3.3 叠加效应	10
1.3.4 复合材料的不足	11
1.4 复合材料的应用	11
2 高性能复合材料的增强体	13
2.1 概述	13
2.1.1 增强体在复合材料中的作用	14
2.1.2 增强体的分类	15
2.1.3 高性能复合材料对纤维增强体的要求	16
2.1.4 纤维具有高强度的原因	16
2.2 玻璃纤维	17
2.2.1 概述	17
2.2.2 玻璃纤维的种类	18
2.2.3 玻璃纤维的制造	19
2.2.4 玻璃纤维的结构	21
2.2.5 玻璃纤维的性能与应用	21
2.3 硼纤维	23
2.3.1 概述	23
2.3.2 硼纤维的制造	23
2.3.3 硼纤维的结构和组织	25
2.3.4 硼纤维的性能	27
2.3.5 硼纤维的应用	28
2.4 碳纤维	28
2.4.1 概述	28
2.4.2 碳纤维的制造	29

2.4.3	工艺过程中碳纤维的结构变化	33
2.4.4	碳纤维的性能	36
2.5	碳化硅纤维	39
2.5.1	化学气相沉积法制造的碳化硅纤维	40
2.5.2	聚合物转化碳化硅纤维	43
2.6	氧化铝纤维	48
2.6.1	制备氧化铝纤维的几种成功的方法	49
2.6.2	氧化铝纤维的性能及应用	50
2.7	晶须	51
2.7.1	概述	51
2.7.2	晶须的制造方法	51
2.7.3	晶须的性能、结构及应用	53
2.8	颗粒增强体	55
2.8.1	概述	55
2.8.2	颗粒增强体的制备、性能和应用	56
2.9	有机纤维	57
2.9.1	芳纶	57
2.9.2	超高分子量聚乙烯纤维	64
3	复合材料的设计原理和复合理论	70
3.1	概述	70
3.2	材料的使用性能、设计目标 and 设计类型	71
3.2.1	材料的使用性能 and 设计目标	71
3.2.2	复合材料的设计类型	72
3.3	复合效应	72
3.3.1	线性效应	72
3.3.2	非线性效应	73
3.4	复合材料设计的内容	74
3.4.1	单元组分材料的选择	74
3.4.2	复合材料制造方法的选择	75
3.5	复合材料力学性能的设计	75
3.5.1	单向复合材料的力学性能设计	75
3.5.2	层合复合材料的力学性能设计	76
3.6	复合材料其他物理性能的复合原理	76
3.6.1	热导率	76
3.6.2	热膨胀系数	77
3.6.3	电导率	77
4	复合材料的界面理论和界面控制	79
4.1	复合材料界面的基本概念	79
4.1.1	界面定义	79
4.1.2	润湿与结合	80

4.1.3	复合材料中纤维与基体的界面	81
4.1.4	复合材料中纤维与基体的界面相容性	82
4.2	界面模型和界面类型	84
4.2.1	界面结合类型	84
4.2.2	金属基复合材料的界面	88
4.3	对界面的要求	92
4.3.1	对界面的力学要求	93
4.3.2	对界面的物理化学要求	94
4.3.3	纤维复合材料受力时界面的力学环境	95
4.4	陶瓷基复合材料的增韧及界面控制	100
4.4.1	陶瓷基复合材料的增韧	100
4.4.2	纤维增强陶瓷基复合材料的界面控制	105
4.4.3	界面相的结构与性能表征	108
5	聚合物基体和高性能聚合物基复合材料	111
5.1	聚合物基体	111
5.1.1	概述	111
5.1.2	环氧树脂	114
5.1.3	酚醛树脂	132
5.1.4	不饱和聚酯树脂	145
5.1.5	高性能树脂	157
5.2	高性能聚合物基复合材料	174
5.2.1	聚合物基复合材料的制造	174
5.2.2	聚合物基复合材料的结构和性能	190
5.2.3	聚合物基复合材料的界面	195
5.2.4	聚合物基复合材料的应用	198
6	金属基体与金属基复合材料	199
6.1	高性能复合材料的金属基体	199
6.1.1	概述	199
6.1.2	用纤维增强金属的原因	200
6.1.3	选择金属基体的原则	201
6.1.4	常用金属基体材料	202
6.1.5	金属的晶体结构和晶体缺陷	205
6.1.6	金属的强化方法	208
6.2	金属基复合材料	210
6.2.1	概述	210
6.2.2	金属基复合材料的制造方法	210
6.2.3	金属基复合材料的界面	224
6.2.4	金属基复合材料的结构与性能	228
6.2.5	金属基复合材料的应用	237
7	陶瓷基体和高性能陶瓷基复合材料	240

7.1 陶瓷概述	240
7.1.1 陶瓷的键合	240
7.1.2 陶瓷的性能	240
7.1.3 陶瓷和玻璃陶瓷的晶体结构	242
7.1.4 常用陶瓷基体材料	245
7.2 高性能陶瓷基复合材料	249
7.2.1 概述	249
7.2.2 高性能陶瓷基复合材料的制造	249
7.2.3 高性能陶瓷基复合材料的结构和性能	271
7.2.4 高性能陶瓷基复合材料的界面	276
7.2.5 高性能陶瓷基复合材料的应用	277
8 高性能复合材料发展现状与发展方向	279
8.1 国内复合材料发展现状与发展方向	279
8.1.1 航天功能复合材料的现状与展望	279
8.1.2 结构复合材料的研究进展	281
8.1.3 值得重视的复合材料研究新动向	282
8.2 国际上对复合材料的展望	284
8.2.1 国际复合材料发展中的普遍性问题	284
8.2.2 国际上对复合材料所存在问题的对策	284
参考文献	285

1 概 论

1.1 高性能复合材料的发展史

现代复合材料是材料历史中合成材料时期的产物，这里所说的现代复合材料不包括天然复合材料和许多历史遗迹中所发现的所谓早期复合材料。学术界开始使用“复合材料”(composite materials)一词大约是在 20 世纪 40 年代，当时出现了玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂，开辟了现代复合材料的新纪元。由 20 世纪 60 年代开始，陆续开发出多种高性能纤维。20 世纪 80 年代以后，由于人们丰富了设计、制造和测试等方面的知识和经验，加上各类作为复合材料基体的材料的使用和改进，使现代复合材料的发展达到了更高的水平，即进入高性能复合材料的发展阶段。高性能复合材料是本书研究的主要对象，为了弄清它的发展进程，本节简要介绍材料及复合材料的发展。

1.1.1 材料发展史

在《辞海》中，材料被定义为“经过人类劳动取得的劳动对象”。材料是能为人类经济地制造有用器件的物质。材料的发展标志着社会生产力的发展水平和人类文明进步的程度。每一种新材料的出现和制造技术的进步都在不同程度上促进了生产力的发展。同时，材料的发展又为先进生产力发展的要求所推动，并受制于当时生产力发展的总水平。

在考古研究和历史学中，材料作为划分时代的依据，将人类历史划分为：石器时代（距今 10000~6000 年）、青铜器时代（距今 6000~2500 年）、铁器时代（距今 2500 年起）。从铁器时代起，世界各国多已进入有文字记载的文明时代。

按照材料的工艺和性质可将材料划分为天然材料、人工材料和合成材料三大类。

大约在 1 万年前的旧石器时代，人类使用的是天然材料，即只将自然界的物质从形态上加以改变制成所需的物品，而不改变材料本身的构成与性质。如将石块敲碎、磨凿制作工具；用木材、磨制的动物骨骼作武器和工具；堆石、挖坑作屋；用泥土制泥坯（日晒泥砖）砌墙或夯泥为墙（干打垒）；用木材架屋顶并用茅草覆盖和用动物毛皮御寒等。

新石器时代出现了陶器，最初的陶器是一种质地粗糙且不透明的黏土制品。但它属于人工材料，即不仅在形态上，而且在质地上改变了天然物质的性质。从天然材料到人工材料，这是材料发展中的第一次飞跃。陶器由黏土（或掺加石英等）经成型、干燥和烧制而成。主要作为生活用具。恩格斯认为，陶器是人类从蒙昧时代进入野蛮时代的标志。另一个人工材料的例子是砖。古埃及人用尼罗河的泥土烧砖修建住宅。中国秦代曾用大量砖瓦修筑长城和宫殿。铜和铁是人类历史上最重要的人工材料，分别由铜矿石（孔雀石）和铁矿石（赤铁矿）冶炼而成。用铜制剑、祭器和酒具；用铁制盔甲、兵器和工具等在史料中均有记载。

材料的发展与人类认识、使用和驾驭能源能力的水平密切相关。19 世纪的产业革命也是人类开发和获取能源的革命，它促进了钢铁、有色金属等材料的发展，造就了现代文明。由于革新了材料的制造技术，人们利用合成方法制成了自然界不存在的材料，称为合成材料。20 世纪初（1909 年），贝克兰德（L.H.Backland）用苯酚和甲醛经缩聚反应合成了实

用酚醛树脂（俗称电木），这是最早的合成材料。合成材料不仅包含有机材料系列，如酚醛树脂、聚氯乙烯、聚碳酸酯、聚甲醛、环氧树脂等，而且包括无机材料系列，如超铀元素钚（ ^{238}Pu ）、立方晶系氮化硼（CBN）、氧化铝和碳化硅等。

1.1.2 复合材料发展史

复合材料的历史一般可以分为两个阶段，即早期复合材料和现代复合材料。这里不包括具有复合材料特征的天然物质（如木材、骨骼、贝壳和海带等）。

早期复合材料的历史较长，很多实例散见于现存的历史遗迹中，并且多少可以从中发现现代复合材料的思想萌芽。

中国西安半坡村原始人遗址（属仰韶文化）中发现用草拌泥作墙体和地面，即以天然纤维状材料——草——作为黏土的增强剂，用来阻止黏土的干裂和剥落，提高墙体和地面耐受侵蚀的能力，增进了黏土的实用性能，这可以算是纤维复合材料的渊源；公元前 3000 年左右，古埃及和美索不达米亚人用芦苇、纸莎草加沥青或树胶制造的小艇，也可以看作现代复合材料船的前身；中国西周时期（约公元前 1000 年）用木片或竹片、动物的腱和鬃、丝等制作弓，是混杂复合材料的祖先；古埃及干尸（木乃伊）是将用香料处理过的尸体缠绕亚麻布带后再浸渍天然树脂，它是缠绕工艺的雏形，与现代复合材料的管道、压力容器等的成型工艺在原理上是一致的，同时也符合现代防腐工程的原理；日本绳纹文化（日本新石器时代）中期以后，已经知道在矾土（黏土）中加云母和砂粒来改进陶器性能，防止烧结时龟裂，这是粒子增强陶瓷复合材料思想的萌芽；中国春秋战国时期（距今约 2500 年），用含锡量较低的青铜作剑身，采用两次浇注技术，在其刃部复合一层含锡量较高的青铜，并在锡青铜表面涂覆一层硫化铜（含铬和镍）制成花纹，使其内柔外刚，刚柔相济，作为其代表的著名的越王勾践剑，1965 年在湖北江陵楚墓出土时，仍然光可鉴人，锋利异常，被誉为“永不生锈的青铜剑”。它可看成是最早的包层金属复合材料；印度人用细砂和虫胶制作磨刀石，这是现代砂轮的前身，是颗粒增强复合材料的又一例子；公元前埃及金字塔采用了砂石和火山灰制成的混凝土，这也可看成是颗粒复合材料；中国民间的布底鞋，代表着三向编织复合材料的雏形；古埃及文明时代，木材复合材料已有所应用，人们利用紫檀木贴在普通木材上进行表面装饰（如棺槨），到了工业革命以后，欧、美等国发明了薄片加工机械和各种锯，并与粘接剂（胶）技术结合，才演变到胶合板和装饰板的工业生产，这是叠层复合材料的前身。

早期复合材料中最有代表性的例子是中国古代发明的漆器。1972~1974 年，湖南省马王堆出土的漆器（距今 2200 年以上）是西汉初年的文物。这些漆器用丝和麻作增强材料，用大漆作粘接剂，或以木材为胎，外表涂以漆层，制成鼎、酒壶、盆具、茶几等物品，在潮湿地下埋藏了 2000 多年，依然是熠熠生辉、光彩夺目。20 世纪 70 年代，湖北随县出土的曾侯乙墓中，有许多用于车战的多戈戟和殳，它们的杆长 3~4 m，在木制杆芯外面包以纵向竹丝，再用大漆加蚕丝线进行环向缠绕，然后浸渍大漆制成。大漆是漆树分泌的一种天然树脂，干燥后能形成漆膜，不但坚硬光泽，而且耐水耐热（250℃）、耐化学腐蚀。中国早在 7000 多年前的新石器时代，就有了油漆技术的萌芽，在商代已经成熟。在战国时代，除了木胎漆器外，又出现皮胎漆器和夹苎胎（即用麻布作胎）的漆器。秦、汉时期至以后，油漆技术经历了大发展并基本定型。魏晋南北朝时期，在改革底胎和面漆的基础上，创造了夹苎胎法制造佛像的工艺，即先塑出泥胎，再在泥胎外面粘贴麻布，在麻布上进行涂漆和彩绘，当油漆干燥后，挖出并用水冲去泥胎，得到中空的漆佛像。这种佛像十分轻巧且非常坚固耐久。几米高的佛像，一个人就轻易举起行走（称为“行像”）。其制造工艺与当今的手糊

成型几乎没有区别。大约在唐朝，脱胎漆佛像技术传到日本。日本至今还保存着当年唐代著名高僧鉴真和尚东渡日本在该国圆寂时塑制的夹苎座像，作为日本的“国宝”级文物，每年只对外开放数天供人瞻仰。这座佛像经历了 1000 多年仍然保持完好。充分说明了这种早期复合材料优异的抗老化性能。

现代复合材料的发展只有 60 多年历史，它的主要特征是基体采用合成材料。1940 年，世界上第一次用玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂制造了军用飞机雷达罩。1942 年，用手糊工艺制成第一艘玻璃钢渔船。至 20 世纪 60~70 年代，玻璃纤维增强塑料（简记为 GFRP，俗称玻璃钢）制品已经广泛应用于航空、机械、化学、体育和建筑工业中。这种复合材料中玻璃纤维的用量为 30%~60%，所用基体材料主要有不饱和聚酯树脂、环氧树脂和酚醛树脂。玻璃钢的比强度（即拉伸强度/密度）比钢还要高，而且耐腐蚀性能好，被称之为第一代现代复合材料。

20 世纪 80 年代以后，由于人们丰富了复合材料设计、制造和测试等方面的知识与经验，如层合板力学性能的准确计算；短纤维或连续纤维的纱束、垫、毡或编织物、编织布及预浸料的制作；模压、缠绕、拉挤、注射等成型工艺的出现；性能标准化以及玻璃纤维、树脂等原材料的不断改进，使玻璃纤维增强塑料的发展达到成熟阶段。但是，与现代高新技术所要求的性能相比，它的许多性能尤其是模量和使用温度尚嫌不足，因此，玻璃钢不属于高级复合材料的范畴。

现代技术对高级复合材料（advanced composite materials，简记为 ACM）的要求是：不仅比强度（强度/密度）高，而且要求比刚度（模量/密度）高，同时剪切强度和剪切模量要高；高温性能和耐热性也要高。针对玻璃纤维模量较低的主要缺点，20 世纪 50~60 年代相继开发了硼（B）纤维、碳（C）纤维和芳纶纤维（Kevlar）。早期生产的这些纤维的性能示于表 1-1。由表 1-1 可见，硼、碳和芳纶纤维均具有比玻璃纤维高得多的杨氏模量和更低的密度。这类纤维被称为高级纤维（advanced fibers）。另一方面，玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂的耐热性能较差，当温度大于 60℃，其力学性能开始下降，温度为 90℃时，力学性能保留率仅为 60%。用硼纤维、碳纤维和芳纶纤维增强塑料基复合材料（BFRP、CFRP 和 KFRP）的最高使用温度长期可达 150℃以上，它们兼具高比刚度和比强度，称为第二代现代复合材料。

表 1-1 玻璃纤维和初期生产的硼纤维、碳纤维和芳纶纤维的性能

纤维类型	拉伸强度/GPa	杨氏模量/GPa	密度/g·cm ⁻³	备注（代号）
E-玻璃	3.4	72.1	2.54	
S-玻璃	4.6	84.8	2.49	
硼（W 芯）	2.8	411.9	2.60	
碳（沥青基）	2.0	343.3	1.60	UCC-50
碳（PAN 基）	1.8	411.9	1.95	Morganite (PAN-1)
芳纶	2.9	127.5	1.45	Kevlar-49

用聚酰亚胺作基体，以上述高级纤维作增强体的复合材料，使用温度较高，但不超过 200℃，用金属（铝、镁、钛、金属间化合物）作基体的复合材料，使用温度范围是 175~900℃。用陶瓷（碳化硅、氮化硅、碳等）作基体的复合材料，使用温度范围是 1000~2000℃。20 世纪 70 年代，开发了耐热性更高的氧化铝纤维和碳化硅纤维，还开发了各种晶须（如碳化硅晶须和氧化铝晶须等），使现代复合材料的性能向耐热、高韧性和多功能方

向发展，称为第三代现代复合材料。

图 1-1 示出现代复合材料的发展过程。第二代和第三代现代复合材料称为高级复合材料或高性能复合材料（也称为先进复合材料）。高级复合材料是具有特殊优异性能的材料，其制造过程涉及先进技术。它主要应用于尖端科学领域，如航天航空，也应用于汽车、体育、建筑、医疗及其他领域。

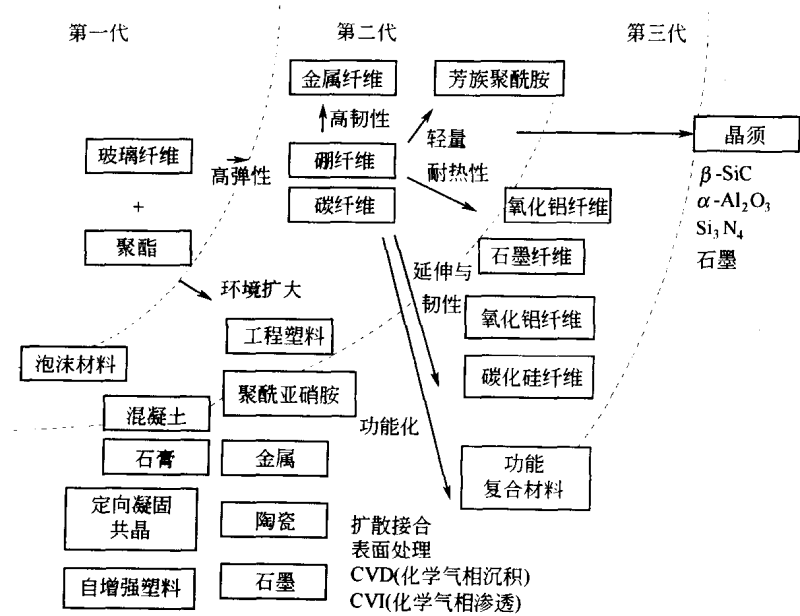


图 1-1 复合材料发展简图

高性能复合材料由各种高性能增强体（纤维及其织物、晶须、颗粒）与各种聚合物、金属、碳及非碳陶瓷基体复合而成。高性能复合材料是具有高比模量、高比强度、优异的高温性能或特殊的多功能的复合材料。按照增强纤维和颗粒的直径大小，可将高性能复合材料分为宏观复合材料和微观复合材料。宏观复合材料是指增强体的尺寸在微米（ μm ）级的复合材料。采用混杂纤维（即两种以上的纤维）或混杂基体（即两种以上的基体）制成性能-成型工艺-成本最佳平衡匹配的复合材料，称为混杂复合材料（hybrid composite materials，简记为 HCM）。不同类型的增强组分以叠层结构形式组成的复合材料称为混杂叠层复合材料。其增强组分可以为纤维、片材或蜂窝芯材，其基体可以为树脂或金属。混杂叠层复合材料的典型例子是铝-纤维/环氧叠层板。通常是将经过表面处理的铝片与纤维织物的环氧树脂预浸片交替叠层后热压而成。常用的纤维有芳纶、碳、玻璃等。铝-芳纶/环氧叠层板（商品名 ARALL）已工业化，用作飞机的蒙皮材料。增强相的尺寸为纳米（nm）等级的复合材料称为纳米复合材料。增强相尺寸控制在埃级（ 10^{-10}m ），即原子或分子水平的称为杂化材料，两者统称微观复合材料，它们主要用作新型结构材料或功能材料。

近年来开发了宏观-微观复合为一体的各种新型复合材料，例如 20 世纪 80 年代后期出现了功能梯度复合材料（即梯度复合材料）。它以先进的材料设计为依据，采用先进的材料复合技术，通过控制构成材料的要素（组成、结构等）由一侧向另一侧呈连续梯度变化，使其内部界面消失，从而获得材料的性质和功能相应于组成和结构的变化而呈现梯度变化的非均质材料。该材料的研制初衷是用作新航天飞机缓和热应力超耐热材料。其制备方法有相分

布控制和粒子排列技术两大类，包括物理真空镀膜、化学气相沉积、粒子排列烧结、等离子喷镀、薄膜叠层和自蔓延高温合成法等。梯度复合材料在核能、电子、光学、化学、电磁学、生物医学乃至日常生活领域都有着一定的潜在应用前景。由于这种材料性能在空间位置的梯度分布规律与材料使用中环境条件对材料性能的要求相适应，因此，由它所制成的器件或结构将具有最优的环境匹配性。它也被称为最先进复合材料。

机敏复合材料 (smart composite) 是现代复合材料发展的最新阶段，机敏复合材料 (或材料-器件的复合结构) 能感知环境变化，并通过改变自身一个或多个性能参数对环境变化及时做出响应，使之与变化后的环境相适应，它一般也称为机敏材料或机敏结构。机敏材料具有自诊断、自适应或自愈合功能，因此，它必然是感知材料和执行材料的复合，有时还需要外接的能源、信息处理和反馈系统。例如，具有自诊断功能的机敏复合材料是把光导纤维与增强纤维一同与基体复合，每根光导纤维均接于独立的光源和检测系统。当复合材料的某处发生应力集中或破坏时，该处的光导纤维即发生相应的应变或断裂，从而可据此诊断出该处的情况。又如，能对振动产生自适应阻尼的机敏复合材料是由压电材料和形状记忆材料与高聚物复合在一起。当压电材料感知振动时，信号启动外接电路使形状记忆合金发生形变，从而改变了复合材料的固有振动模态而减振。机敏复合材料已用于主动检测振动与噪声，主动探测复合材料构件的损伤，根据环境变化主动改变构件几何尺寸等，也可用于控制树脂基复合材料自身的固化过程。

智能复合材料 (intelligent composite) 是机敏复合材料的高级形式。机敏材料对环境能做出线性反应，而智能材料则能根据环境条件的变化程度非线性地使材料与之适应以达到最佳效果。也就是说，在机敏复合材料自诊断、自适应和自愈合的基础上，增加了自决策、自修补的功能，体现具有智能的高级形式。但有的学者对二者并不严格区分而将它们统称为智能材料。智能复合材料和系统也可简称为智能材料和系统，显然，智能材料必然是复合材料而不可能是传统的单一材料。已在研究的智能材料和系统有：自诊断断裂的飞机机翼，自愈合裂纹的混凝土，控制湍流和噪声的机械蒙皮，人工肌肉和皮肤等。在宇航、航空、舰艇、汽车、建筑、机器人、仿生和医药领域已显示出潜在的应用前景。随着复合工艺、集成化和微细加工技术的发展，将会有更多种实用的智能材料问世。

1.2 复合材料的定义和分类

1.2.1 复合材料的定义

复合材料既然属于材料族谱，它的定义也应与材料定义的内涵相符，同时还必须反映出复合材料区别于传统材料的独特性质。从广义上讲，复合材料是由两种或两种以上不同化学性质的组分组合而成的材料。但在现代材料学界中，复合材料专指由两种或两种以上不同相态的组分所组成的材料。复合材料定义为：用经过选择的、含一定数量比的两种或两种以上的组分 (或称组元)，通过人工复合、组成多相、三维结合且各相之间有明显界面的、具有特殊性能的材料。

上述复合材料的定义较易被普遍接受，它不仅明确指出复合材料是“通过人工复合的”和“有特殊性能的”材料，而且还指明了复合材料的组分、结构特点及与其他种材料 (如简单混合物、化合物、合金) 的特征区别。根据复合材料的定义，我们可以从下列几点来进一步了解复合材料的特点：

- ① 复合材料的组分和它们的相对含量是经人工选择和设计的；
- ② 复合材料是经人工制造而非天然形成的（区别于具有某些复合材料形态特征的自然物质）；
- ③ 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）；
- ④ 复合材料的性能取决于各组成相性能的协同。复合材料具有新的、独特的和可用的性能，这种性能是单个组分材料性能所不及或不同的；
- ⑤ 复合材料是各组分之间被明显界面区分的多相材料。

根据上述的复合材料定义，复合材料应不包括自然形成具有某些复合材料形态的物质、化合物、单相合金和多相合金。

1.2.2 复合材料的结构

复合材料由两种以上组分以及它们之间的界面构成。组分材料主要指增强体和基体，它们也被称为复合材料的增强相和基体相。增强相与基体相之间的界面区域因其特殊的结构与组成也被视作复合材料中的“相”，即界面相。增强相和基体相是根据它们组分的物理和化学性质和在最终复合材料中的形态来区分的。其中一个组分是细丝（连续的或短切的）、薄片或颗粒状，具有较高的强度、模量、硬度和脆性，在复合材料承受外加载荷时是主要承载相，称为增强相或增强体（reinforced phase or reinforcement）。它们在复合材料中呈分散形式，被基体相隔离包围，因此也称作分散相；另一个组分是包围增强相并相对较软和韧的贯连材料，称为基体相（matrix phase）。复合材料的各种形态示意于图 1-2。

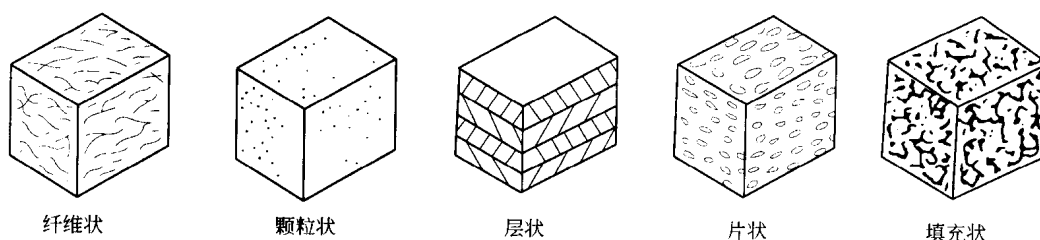


图 1-2 复合材料及其增强相的各种形态

在制造前，基体材料的形状可以是薄片、粉末、块体或无定形的流体，它的状态可以是固态、气态、熔融态或半固-半液态。但是在与增强相固结后，基体相在复合材料中就成为包裹增强相的连续体。因此，基体相也叫做连续相。基体相具有支撑和保护增强相的作用，在复合材料承受外加载荷时，基体相主要以剪切变形的方式起向增强相分配和传递载荷的作用。

在复合材料中，增强相和基体相之间存在着明显的结合面。位于增强相和基体相之间并使这两相彼此相连的、化学成分和力学性质与相邻两相有明显区别、能够在相邻两相间起传递载荷作用的区域，称为复合材料的界面（interfaces）。通常复合材料中界面层的厚度在亚微米以下，但界面层的总面积在复合材料中相当可观，且复合材料的界面特征对复合材料的性能、破坏行为及应用效能有很大影响。所以，人们以极大的注意力开展对复合材料界面的研究。为追求制得具有最佳综合性能的复合材料所进行的这类研究，称为复合材料的表面和界面工程（surface and interface engineering）。

复合材料的性能取决于组分材料的种类、性能、含量和分布，包括：增强体的性能和它

的表面物理、化学状态；基体的结构和性能；增强体的配置、分布和体积含量。复合材料的性能还取决于复合材料的制造工艺条件、复合方法、零件几何形状和使用环境条件。复合材料既能保留原组分材料的主要特色，并通过复合效应获得原组分材料所不具备的性能，还可以通过材料设计使各组分性能相互补充并彼此关联，从而获得新的性能。选择复合材料的组分、增强体分布和复合材料制造工艺，使其具有使用要求的性能的过程，就是复合材料设计。

本书为了简化文字，将具体的复合材料体系表示为“增强相（名称、化学符号或专用代号）/基体相（名称、化学符号或专用代号）”。如碳纤维增强铝复合材料表示为“碳/铝”或“C_f/Al”。

1.2.3 复合材料的分类

按照不同的着眼点，复合材料有许多种分类方法，例如复合材料可以按照使用功能、增强相的几何形态或基体材料的性质进行分类。复合材料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，它基本上是由能承受载荷的增强体组元与能联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。功能复合材料中的增强体又可称为功能体组元，它分布于基体组元中。基体不仅起到构成整体的作用，而且能够产生协同或加强功能的作用。

复合材料按增强体的几何形态分为四类，即纤维增强复合材料、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（包括晶须和短切纤维）增强复合材料。连续纤维复合材料又分为单向纤维（一维）、无纬布叠层（正交、斜交）、二维织物层合、多向编织复合材料和混杂纤维复合材料。定向凝固共晶复合材料中的增强相是原位生长的晶须（或晶片），因此有时也归入纤维增强复合材料中。

颗粒增强复合材料的增强体是不同尺寸的颗粒（球形或者非球形）。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 $1 \sim 25 \mu\text{m}$ ）。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，主要用作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、提高耐受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，人造的片状增强体有机玻璃（又称玻璃鳞片）、铝、铍、银、二硼化铝（ 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 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。片状增强体在片的方向提供各向均衡的性能，当它紧密堆叠时，由重叠形成的曲折途径可以有效地阻碍流体的渗漏，同时也可以减少沿片的法线方向扩展的机械损伤。云母和玻璃鳞片增强复合材料可用于防腐蚀、防渗漏、隔热和电绝缘。金属薄片增强复合材料也可提供防腐蚀和防渗漏性能。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。金属薄片还可产生表面装饰效果和调节复合材料的透光度。

叠层复合材料指复合材料中的增强相是分层铺叠的，即按相互平行的层面配置增强相，而各层之间通过基体材料联接。叠层复合材料中的“层”，可以是前述的单向无纬布、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、木材以及前述的铝箔（在混杂叠层复合材料中）。也有人将双金属层合片、涂覆金属和夹层玻璃归于叠层复合材料。叠层复合材料在其层面方向可以提供优良的性能。

高性能复合材料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 composite，简记为 MMC）和非金属基体复合材料。后者又可以分为两类：聚合物基复合材料（polymer matrix composite，简记为 PMC）和陶瓷基复合材料（ceramic matrix composite，简记为 CMC）。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。有时把金属叠层材料也归入此范畴。聚合物基复合材料又称树脂基复合材料，它是以高聚物（通称树脂）为基体的复合材料。当其增强体是纤维或纤维编织物时，因其高强度与高模量，常作为结构材料；当增强体为粒状、片状或纤维状填充组分时，由于其组成和性能不同，有的作为结构材料，有的作为功能材料。按树脂类型不同，树脂基复合材料又分为热固性树脂基复合材料和热塑性树脂基复合材料。前者的基体树脂有不饱和聚酯、环氧、酚醛、双马来酰亚胺等；后者的基体树脂有聚酰胺、聚丙烯、聚苯硫醚、聚醚醚酮等。陶瓷基复合材料主要是为改善陶瓷材料的脆性而开发的，包括氧化铝陶瓷基、碳化硅陶瓷基、氧化锆陶瓷基、氮化硅陶瓷基、玻璃基和玻璃陶瓷基复合材料以及无机高聚物基复合材料。陶瓷基复合材料还可以按其使用温度分为高温陶瓷基复合材料（它以多晶陶瓷为基体，耐受温度为 1000~1400℃）和低温陶瓷基复合材料（它以玻璃及玻璃陶瓷为基体，耐受温度在 1000℃ 以下）。复合材料分类见图 1-3。

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如下几类：非金属

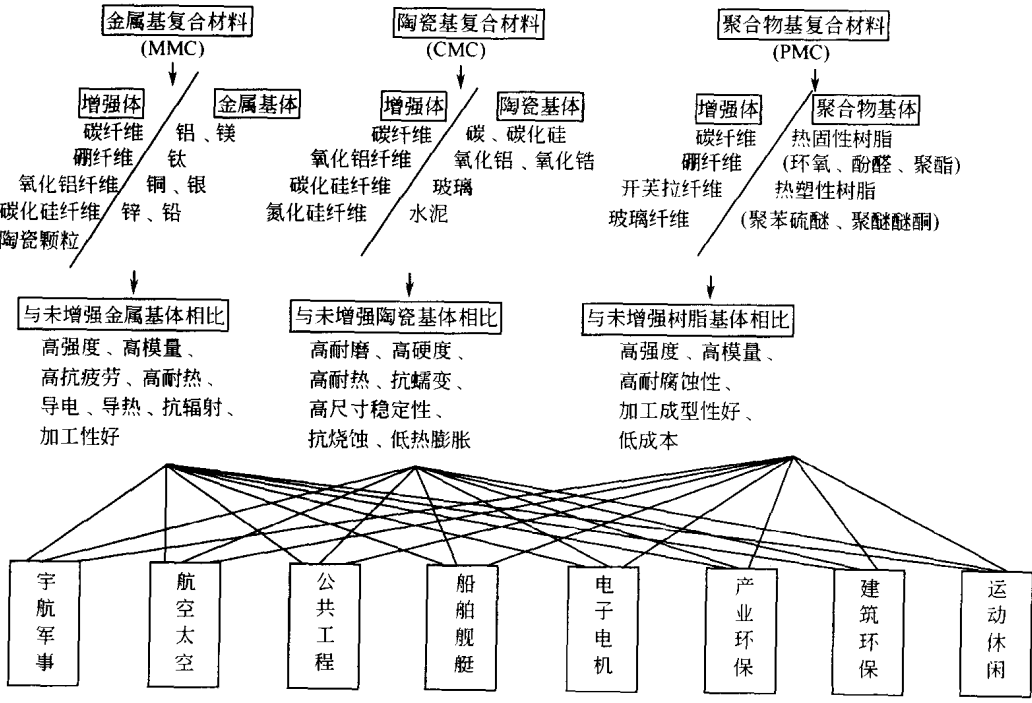


图 1-3 复合材料分类