

580327
高等学校教学用书

金属基复合材料

G AODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

金属基复合材料

沈阳工业大学 于春田 主编

冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

金属基复合材料 / 于春田, 崔建忠, 王磊编. - 北京: 冶金工业出版社, 1995
高等学校教学用书
ISBN 7-5024-1622-6

I. 金... II. ①崔... ②王... III. 金属基复合材料-高等学校-教材 IV. TB331

中国版本图书馆CIP数据核字 (94) 第12716号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷39号, 邮编100009)
三河市印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
1995年5月第1版, 1995年5月第1次印刷
787mm×1092mm 1/16; 13印张; 306千字; 198页; 1-2000册
7.30元

前 言

复合材料自本世纪中叶出现以来，由于其性能优异而受到人们的关注，发展迅速，其中金属基复合材料已成为当今复合材料的发展热点之一，预计21世纪将会发展得更成熟，应用更加广泛。为了适应科学技术发展对材料的需求，促进材料科学的发展，高等学校的一些专业相继开设了新型材料或复合材料选修课，本书正是应此需要而编写的。

复合材料学是一门新型材料学，基本上形成了自己的理论体系，正在日趋完善与成熟，并已在这些基本理论的指导下不断地开发出新的增强材料和复合材料。本书重点阐述了金属基复合材料的复合机理、复合材料力学、复合材料的界面等基本理论，并在此基础上介绍已开发出的各种金属基复合材料的增强材料、复合技术与工艺方法、二次加工方法、力学性能评价方法、各种金属基功能复合材料等，以使学生对各种金属基复合材料的特性、选择与应用具有初步知识。

本书1、5、6章、3.4节和8.8节由沈阳工业大学于春田编写，2、3、4、7章由东北大学崔建忠编写，8、9、10章由东北大学王磊编写。全书由于春田主编、汇总定稿。

编写中参考了一些国内外发表的文献，特向文献作者致谢。对在本书编写、出版过程中给予帮助和支持的有关单位和同志深表谢意。由于作者水平所限，加之时间仓促，缺点和错误在所难免，恳请读者不吝赐教。

编 者
1994年6月

EA096152

本书中英文缩写词汇

- ACM(*Advanced Composite Materials*)高级复合材料
AE(*Acoustic Emission*)声发射
AES(*Auger Electron Spectroscopy*)俄歇电子光谱法
AFM(*Atomic Force Microscope*)原子显微镜
ARALL(*Aramid Reinforced Alminum Laminate*)芳纶增强铝薄板
BFRP或BRP(*Boron Fiber Reinforced Plastics*)硼纤维增强塑料
BFRM或BRM(*Boron Fiber Reinforced Metals*)硼纤维增强金属
BMC (*Bulk Molding Compound*)块状模塑料
CAI(*Computer Aided Instrument*)计算机辅助设备
CFRP或CRP(*Carbon Fiber Reinforced Plastics*)碳纤维增强塑料
CFRM或CRM(*Carbon Fiber Reinforced Metals*)碳纤维增强金属
CIP(*Cold Isostatic Press*)常温等静压法
CM(*Composite Materials*)复合材料
CMC(*Ceramic Matrix Composites*)陶瓷基复合材料
CME(*Crucible Melt Extraction*)坩埚熔液抽出法
CT(*Compact Tensile*)紧凑拉伸
CVD(*Chemical Vapor Deposition*)化学气相沉积
CVI(*Chemical Vapor Injection*)化学气相喷射
DEN(*Double End Notch*)双侧缺口
DS(*Dispersion Strengthening*)分散强化
DSE(*Directionally Solidified Eutectics*)定向凝固共晶合金
DT(*Double Torsion*)双向扭转
EFG(*Edge-defined Film-fed Growth*)定边供膜生长
ER(*Epoxy Resin*)环氧树脂
FGM(*Functionally Gradient Materials*)功能梯度材料
FRC(*Fiber Reinforced Ceramics*)纤维增强陶瓷
FRM(*Fiber Reinforced Metals*)纤维增强金属
FRP(*Fiber Reinforced Plastics*)纤维增强塑料
FRR(*Fiber Reinforced Rubber*)纤维增强橡胶
FW(*Filament Winding*)丝织
HIP(*Hot Isostatic Press*)热等静压
HM(*High Modulus*)高弹性模量
HMC(*Hydroxy Methyl Cellulose*)羟基甲基纤维素
HRS(*High Rapid Solidification*)快速凝固法
HST(*High Supersonic Transport*)极超音速运输机

HT (*High Tensile Strength*) 高强度
IC (*Integrated Circuit*) 集成电路
KDC (*Kneading-Drying-Calcination*) 揉干烧结法
KFRP 或 KRP (*Kevlar Fiber Reinforced Plastics*) 芳纶纤维增强塑料
LLS (*Local Load Shearing Rule*) 局部载荷切断法则
LM (*Low Modulus*) 低弹性模量
LMC (*Liquid Metal Cooling*) 液体金属冷却法
LMC (*Lime Magnesium Carbonate*) 钙镁碳酸盐
LSI (*Large Scale Integrated Circuit*) 大规模集成电路
MA (*Mechanical Alloying*) 机械合金化
MMC (*Metal Matrix Composites*) 金属基复合材料
NASP (*National Aeronautics and Space Plan*) (美国) 国家航空航天计划
ODS (*Oxide Dispersion Strengthening*) 氧化物分散强化
PAN (*Polyacrylonitrile*) 聚丙烯腈
PBI (*Polybenzimidazole*) 聚苯并咪唑
PD法 (*Power Down*) 功率下降法
PDME法 (*Pendant Drop Melting Extraction*) 下垂液滴抽出法
PI (*Polyamide*) 聚酰胺
PMC (*Polymer Matrix Composites*) 聚合物基复合材料
PMMA (*Polymethyl Methacrylate*) 有机玻璃
PRM (*Powder Reinforced Metals*) 颗粒增强金属
PVD (*Physical Vapor Deposition*) 物理气相沉积
RIM (*Reactional Injection Molding*) 反应性注射成形
R-RIM (*Reinforced RIM*) 增强反应性注射成形
RMS (*Range Measurement System*) 分布测量系统
ROM (*Rule of Mixture*) 混合律, 复合准则
RSPD (*Rapid Solidification Plasma-Deposition*) 快速凝固等离子喷镀
R-T膜 (*Rare Earth Transition Metals*) 稀土-过渡金属膜
SAP (*Sintered Aluminum Powder*) 烧结铝粉
SD法 (*Spray-Dispersion Method*) 喷射弥散法
SF (*Staple Fiber*) 人造短纤维
SST (*Supersonic Transport*) 超音速运输机
STM (*Scanning Tunnel Microscope*) 扫描隧道显微镜
TBC (*Thermal Barrier Coating*) 隔热包覆
UHM (*Ultra High Modulus*) 超高弹性模量
UHT (*Ultra High Tensile Strength*) 超高强度
XMC (*Xylene Monochloride*) 一氯化二甲苯
ZMC (*Zinc Dimethyl Dithiocarbonate*) 二甲基荒酸锌

目 录

1. 绪论	1
1.1 复合材料介绍	1
1.2 复合材料的历史及发展现状	3
1.3 复合材料的分类及其命名	6
1.4 金属基复合材料的发展史、种类及特性	9
2. 复合理论	14
2.1 力学性能的复合准则	14
2.2 复合材料的相容性	28
2.3 金属基体与增强材料的润湿性	33
3. 复合材料力学	36
3.1 概述	36
3.2 单向层合板的正轴刚度	36
3.3 单向层合板的强度	42
3.4 复合材料结构设计要点	46
4. 复合材料的界面	49
4.1 界面的物理化学特征	49
4.2 界面反应	50
4.3 界面力学与变形、断裂	54
5. 增强材料	69
5.1 材料的选择	69
5.2 无机纤维	72
5.3 金属纤维	93
5.4 其它纤维	94
5.5 颗粒增强材料	95
5.6 增强纤维的表面处理	96
6. 金属基复合材料的制法及特性	105
6.1 概述	105
6.2 纤维增强金属基复合材料的复合成形	105
6.3 分散强化金属基复合材料的复合成形	117
6.4 颗粒增强金属基复合材料的复合成形	118
6.5 定向凝固法	122
6.6 金属基混杂复合材料	125
6.7 金属基复合材料的特性	127
7. 复合材料的二次加工	137
7.1 复合材料的机械加工	137
7.2 成形加工	137
7.3 机械连接	138

7.4	复合材料的焊接.....	130
7.5	复合材料的修补.....	140
8.	金属基复合材料力学性能的评价方法.....	141
8.1	新的强度标准.....	141
8.2	纤维的强度.....	145
8.3	复合材料的抗拉强度.....	147
8.4	复合材料的弯曲强度.....	149
8.5	界面强度的测定.....	151
8.6	复合材料的断裂韧性.....	154
8.7	复合材料的冲击性能.....	159
8.8	无损检测方法.....	161
9.	金属基功能复合材料.....	166
9.1	复合材料具有的功能.....	166
9.2	电气功能复合材料.....	167
9.3	磁性功能复合材料.....	168
9.4	电磁功能复合材料.....	172
9.5	热功能复合材料.....	175
9.6	其它功能复合材料.....	183
10.	金属基复合材料的前景展望.....	187
10.1	高温耐热结构复合材料的新成员.....	187
10.2	功能梯度复合材料.....	191
10.3	金属系智能复合材料.....	195
10.4	金属基复合材料的未来.....	197

1. 绪 论

1.1 复合材料介绍

复合材料是由两种或两种以上的材料通过复合工艺组合而成的一种多相材料，其性能明显优于原材料。钢筋混凝土就是一种典型的复合材料。将砂、砾石等廉价材料用水泥浆固结的混凝土虽具有一定的抗压强度，但比较脆，受拉伸容易产生裂纹而破坏，但若在混凝土里加上用铁丝捆绑的钢筋而得到的钢筋混凝土，不但具有一定的抗压强度，而且还提高了抗拉、抗弯能力，是土建中不可缺少的材料。实际上，复合材料一词中是包含有下列含义的：

(1) 复合材料的组分是人们有意选择和设计的，是一类性能可以设计的新型材料。

(2) 复合材料是人工制造的，不是天然形成的。木材、竹子、骨骼等虽具有复合结构，但不是复合材料，它们是具有复合材料形态的天然材料。

(3) 复合材料至少包括两种独立的不相同的化学相。

(4) 复合材料的性能取决于每种组分相及其相应的含量。

(5) 复合材料的组分相必须有重复的几何形状，这样在相当大的范围内可以把材料看成是均匀的。蜂窝状夹层结构或同轴电缆就不符合这条标准，把它们作为结构看待比作为材料更合适。

(6) 所制成的复合材料具有单个组分所没有的优良性能。

近代复合材料的发展时间还不长，人们对它的认识和了解还不充分，近年来人们常见的典型复合材料——纤维增强材料，它就具有下列特点：

(1) 比强度、比模量高。强度和弹性模量与密度的比值分别称为比强度和比模量，它们是衡量材料承载能力的一个重要指标。比强度愈高，同一零件的自重愈小；比模量愈高，零件的刚性愈大。一般钢材和铝合金的比强度约为 $0.13 \times 10^6 \text{cm}$ 和 $0.17 \times 10^6 \text{cm}$ ，比模量约为 $0.27 \times 10^9 \text{cm}$ 和 $0.26 \times 10^9 \text{cm}$ ；高强碳纤维/环氧树脂复合材料的比强度可达 $1.03 \times 10^6 \text{cm}$ ，比模量为 $0.21 \times 10^9 \text{cm}$ ；高模量碳纤维/环氧树脂复合材料比模量可达 $1.5 \times 10^9 \text{cm}$ ，比强度为 $0.67 \times 10^6 \text{cm}$ 。从上述数据的比较可以清楚地看出，纤维增强复合材料的比强度和比模量远远超过一般钢材和铝合金。

(2) 抗疲劳性能好。疲劳破坏是材料在交变载荷作用下由裂纹的产生和扩展而形成的低应力破坏，大多数金属材料的疲劳极限仅是其抗拉强度的40%~50%。纤维增强复合材料的疲劳破坏总是从纤维的薄弱环节开始，逐渐扩展到纤维与基体的界面上，而界面又能阻止裂纹的扩展，故碳纤维/聚酯树脂复合材料的疲劳极限可达其抗拉强度的70%~80%。此外，复合材料的抗声振疲劳性能也很好。

(3) 高韧性和抗冲击性，高电导性和热导性。金属基复合材料具有高韧性和高抗冲击性能，在受到冲击时能通过塑性变形吸收能量。它的高电导和热导性能可以使局部的高温热源和电荷很快扩散消失，有利于解决热气流冲击和雷击问题。

(4) 破损安全性好。纤维增强复合材料内有大量的独立纤维，每平方厘米上的纤维

数少则几千根，多则几万根，从力学观点来看是典型的静不定体系。当这种材料的构件超载并有少量纤维断裂时，其载荷会重新分配在未断裂的纤维上，这样，在短期内不致于使整个构件丧失承载能力。

(5) 减震性能好。结构的自振频率除与结构本身形状有关，还与材料比模量的平方根成正比。复合材料具有高的自振频率，因此工作时就不易引起共振。同时，复合材料中纤维与基体间的界面具有吸振能力，因此它对振动有很强的阻尼作用。对相同形状和尺寸的梁进行振动阻尼实验，轻合金梁需9s才能停止振动，碳纤维复合材料梁只需2.5s就静止了。

(6) 减摩、耐磨、自润滑性好。在热塑性塑料中加入少量短纤维可以大大提高它的耐磨性，如聚氯乙烯与碳纤维复合后耐磨性增加3.8倍，还降低了摩擦系数。 Al_2O_3 短纤维与铝合金复合后，与轴承钢组成摩擦副做磨损实验时，磨损量仅为铝合金的1/96。碳纤维增强塑料具有良好的自润滑性能，可用于制造无油润滑活塞环、轴承和齿轮。

如用石棉之类的材料与塑料复合，则可以得到摩擦系数大、制动效果好的摩擦材料。

(7) 耐热性高，高温性能好。树脂基复合材料的耐热性一般都要比与它相应的塑料有明显的提高，金属基复合材料在这方面更显示出它的优异性。一般铝合金在400℃时其弹性模量就会大幅度下降（几乎接近于零），强度也显著降低。用碳或硼纤维增强的铝合金，在这个温度下强度和弹性模量基本不变。碳纤维增强的镍基合金的比重比未增强的镍基合金小，高温性能好。碳化硅纤维、氧化铝纤维与陶瓷复合，在空气中能耐1200~1400℃的高温，这要比最好的高温合金耐热性高100℃以上。用它做柴油发动机，可取消原来的散热器、水泵等冷却系统，减轻重量约100kg，用它做汽车发动机，使用温度可高达1370℃。

(8) 纤维增强塑料化学稳定性优良。钢材一般不耐酸，尤其是不耐含有氯离子的酸，即使含钼不锈钢在这种介质中也会很快被腐蚀。但纤维增强塑料，如玻璃纤维增强树脂，能在含氯离子的酸性介质中长期使用。用玻璃纤维增强塑料可制造耐强酸、盐、酯和某些溶剂的化工管道、泵、阀、容器、风机、搅拌器等。耐碱玻璃纤维或碳纤维与塑料复合，还能在强碱介质中使用。

(9) 能组成各种功能材料。玻璃纤维增强塑料是一种优良的电绝缘材料，用于制造仪表、电机与电器中的绝缘零件，不但可提高电气设备的可靠性，而且还能延长使用寿命，在高频作用下仍能保持良好的介电性能。因此，飞机、导弹和地面雷达罩都采用它来制造。金属基复合材料中也有多种功能材料，这将在第9章中加以介绍。

(10) 成形工艺简单灵活及材料、结构的可设计性。复合材料可用模具一次成形法来制造各种构件，从而减少了零部件的数目及接头等紧固件，并可节省原材料及工时。更为突出的是复合材料可以通过纤维种类和不同排布的设计，把潜在的性能集中到必要的方向，使增强材料更有效地发挥作用。通过调整复合材料各组分的成分，结构及排布方式，既能使构件在不同方向承受不同的作用力，还可制成兼有刚性和韧性、弹性和塑性及矛盾性能的复合材料及多功能制品。

上面所列出的仅是复合材料的一些主要特性，概括起来有两方面，一是强调了复合效果，一是体现了复合材料的可设计性。

复合效果显示出了复合材料在性能上和成形上具有它的组分所没有的各种长处。一般

来说复合效果表现为线性的及非线性的两种，如表1-1所示。

表1-1 复合效果的表现形式

A 线性效果	B 非线性效果
1 平均效果	1 相乘效果
2 并列效果	2 感应效果
3 互补效果	3 共振效果
4 抵消效果	4 系统化效果

复合材料的弹性模量即是A-1的平均效果。在复合效果中，非线性效果最大，特别是产生共振效果时，其性能可能飞跃式的提高。因此，复合材料能产生其组分所没有的特性。

复合材料的可设计性有利于最大限度的发挥材料作用，减少材料用量，满足特殊性能要求。

尽管复合材料发展历史并不长，但由于有上述一些优良性能，因此成为一种引人注目的新型材料。预计下一个世纪会发展得更快更成熟，并有广泛的应用，所以有“21世纪材料”之称。

1.2 复合材料的历史及发展现状

1.2.1 历史悠久的复合材料

草增强泥复合材料 现在在农村还有使用草和泥砌墙和打土坯的，这种草和泥材料的应用可以追溯到人类文明的前期。西安半坡村的原始公社遗址距今已七千多年了，那时房屋的墙体就已是草和泥砌筑的，这种墙体材料套用现代复合材料术语可以称为草增强泥复合材料，其复合思想无疑是受了燕雀啣泥筑巢的启发，是仿生学的早期实例之一。

漆器 我国在四千多年前的虞夏时代就有了使用漆器的记载，其中制作珍贵用具和佛像的脱胎漆器，是我国古代辉煌工艺成就之一。它就是以固化生漆为基体，麻布为增强材料的一种复合材料。

弓 12~13世纪成吉思汗的蒙古大军所使用的弓不仅短而轻，而且射程远，它是由动物的腱、角和木片贴成的复合材料。现在的弓则是地地道道的复合材料，弓身是层合的纤维强化塑料，把手处是树脂含浸塑料。

1.2.2 近代复合材料

层合板 现在在木器傢具和装饰材料中广泛使用的层合板是随着木材薄板加工技术和粘结剂的发展于19世纪后半叶工业化生产的。

钢筋混凝土 现在在土建中广泛使用的钢筋混凝土是随着水泥制造和炼钢轧钢技术的发展而在19世纪中叶出现的，1867年有了专利，在20世纪初成为工程材料。

纤维增强橡胶 10世纪以前，在天然橡胶的原产地中南美洲人们就已知道用天然橡胶做防水布了，1843年后40多年间相继发明了实心轮胎、充气轮胎和把橡胶涂在亚麻布上卷成内胎的充气轮胎。现在用橡胶做内胎，用纤维增强橡胶做轮胎的原形是1893年提出来的，20年后才定型的。这种轮胎自用于汽车以来，一直支持着汽车工业的发展，它使用过的增强材料有棉线、钢丝、尼龙丝、聚脂纤维、玻璃纤维、芳纶纤维。可以说近代复合材

料的产生是以纤维增强橡胶充气轮胎为最早的。还有纤维增强橡胶膜，又称橡胶布，其中的纤维（或织物）用于提供强度，承担外力，保持尺寸形状，橡胶用于固定和保持纤维，保证气密性或水密性，可用于制作气球、飞船气囊、潜水服等。

1.2.3 现代复合材料及发展现状

第一代复合材料 第二次世界大战中，在“比铝轻比钢强”这一宣传下，玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂，即玻璃纤维增强塑料（GRP或GFRP）被美国空军用于制造飞机的构件。从积极的利用纤维的强度、通过特性设计制造材料的观点看，大多认为复合材料是由1942年的玻璃纤维增强聚酯树脂开始的。由于玻璃纤维增强塑料的比强度和比模量均超过通常的钢材而成为引起人们注目的材料，二战后迅速发展成一个工业部门，“复合材料”一词也开始在民间使用了。随着50年代到60年代初期，美国把玻璃纤维增强复合材料大量应用于导弹武器和航天飞行器上，我国也于60年代中期开始了在军工和建筑部门的应用，现在在国民经济的各部门都有应用。

第二代复合材料 由于玻璃纤维增强复合材料的比刚度、耐热性和耐候性等方面还不够理想，难以满足对重量较为敏感，工作条件较为苛刻的尖端技术领域的要求。为了提高复合材料的性能，1960~1970年间研究和许多新型的纤维与晶须，例如碳纤维、硼纤维、芳纶纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维以及碳化硅晶须、氧化铝晶须等。用这些纤维（晶须）作增强材料制成的复合材料当时被叫做先进复合材料（ACM），是继玻璃纤维增强材料之后的第二代复合材料。

碳纤维增强塑料（CRP或CFRP）是第二代复合材料的代表。碳纤维不仅密度低、强度高、弹性模量高、热膨胀系数小，且能耐多种介质腐蚀，是一种较为理想的增强材料。美国把碳纤维增强塑料广泛应用于航空、航天飞行器及导弹上，全复合材料（主要是碳/环氧复合材料）的飞机已试飞成功。碳纤维增强塑料可在300℃以上高温长期使用，已用来做飞机发动机叶片和喷气发动机罩等高温工作构件。我国的碳纤维发展开始于60年代中期，碳纤维增强树脂复合材料首先用于航空与航天飞行器的某些构件上。随着世界上许多国家逐渐将碳纤维复合材料应用于民用工业，我国也进行了研制工作，已制成了不少部件。但由于我国现在碳纤维的产量不高且价格较贵，其发展和应用还是有限的。

硼纤维于1958年最初制成，由于其比模量较高，适于制造高模高强的复合材料。我国在60年代初期就开始了实验室研究，由于硼纤维制造工艺复杂，难以实现大规模生产且价格昂贵，并由于后来出现的碳纤维、碳化硅纤维及其复合材料的性能都与硼纤维及其复合材料的性能接近，易于生产而且价格相对便宜，所以已没有大量发展硼纤维的必要，我国的硼纤维复合材料的研究没有投入使用。美国只有AVCO一家继续供应那些原来采用硼纤维复合材料的飞机制造厂，以维持原设计构件的生产。

1968年美国杜邦公司制成一种高强度高模量的有机纤维——芳纶纤维，1972年正式投产，商品名为Kevlar，有三种规格。由于芳纶纤维具有密度小（只有钢丝的1/5~1/5.5），热稳定性好（能耐240℃），抗拉强度高、模量中等，耐疲劳、耐磨、耐腐蚀、热膨胀系数小等特点，有“人造钢丝”之称，各国相继进行剖析、研制，现已有二十多种规格，开发了上百种用途。我国也早已开始研制芳纶纤维及其复合材料，在原材料的合成、纤维生产及复合材料的应用等方面进行了大量的工作。

碳化硅纤维和氧化铝纤维及其晶须是近年来发展起来的性能较好的纤维和晶须，由其

研制成的复合材料也已投入使用。我国在这种纤维和复合材料的研制上也取得了喜人的进展。

上述复合材料都是聚合物基复合材料 (PMC)，主要是以环氧树脂为基体的，由于树脂是塑料的主要成分，因此树脂基复合材料又称塑料基复合材料或纤维增强塑料 (FRP)。随着复合材料的应用逐渐向主受力结构件过渡和使用温度越来越高，环氧树脂正由传统的双酚A型环氧向有各种性能的优良的环氧树脂发展。由于环氧树脂无法满足长期耐热200℃的工作条件，因而开发出了双马来酰亚胺 (BMI) 和聚酰亚胺 (PI) 等耐热热固性树脂，长期使用温度可提高到260~300℃。但这两种树脂的韧性仍不好，近年来国外正在发展高性能的热塑性树脂，其中最有帮助的是聚醚醚酮 (PEEK) 和聚苯硫醚 (PPS)。

聚合物基复合材料目前存在的主要问题是横向力学性能差，层间剪切强度低，还存在着易吸潮、老化、蠕变、燃烧等缺点。现在聚合物基复合材料的最高使用温度可以达到350℃，争取达到425℃，再高的温度它就无能为力了。

第三代复合材料 随着科学技术的发展，对材料性能的要求日益苛刻，上述一些复合材料在刚度和使用温度方面往往难以满足需要。由图1-1可以看出：纤维增强橡胶和纤维增强热塑性塑料的杨氏模量较低，使用温度一般低于80℃；纤维增强热固性塑料长期使用温度一般低于300℃；个别特殊耐高温树脂基体，如聚酰亚胺复合材料使用温度也低于400℃。用高模量高强度纤维与金属基体或陶瓷基体复合可以得到耐热性良好的复合材料并可望改善陶瓷的韧性。这两类复合材料的强度和刚度不仅较纯基体材料大为提高，而且由于纤维的作用，它们的耐热温度范围也高于纯基体材料。本书介绍的是金属基复合材料 (MMC)。陶瓷比金属轻而硬，不生锈，能耐1000℃以上的高温，且资源丰富，但其最大的缺点是它的脆性。用高强高模量的纤维作增强材料制成纤维增强陶瓷复合材料 (CMC)，无疑可使陶瓷的强度、冲击韧性和断裂韧性提高、脆性降低。纤维增强陶瓷已有二十多年的研究开发历史了，取得成功，已应用的实例是碳 (石墨) 纤维增强碳及碳 (石墨) 纤维增强石英。

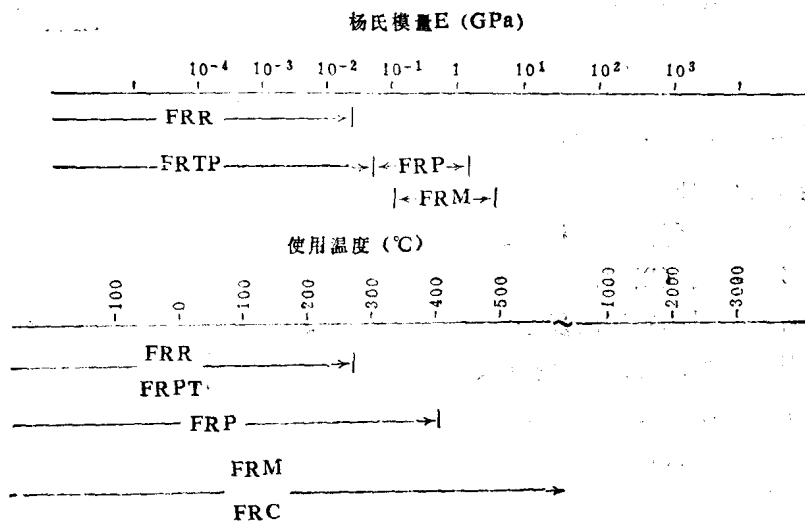


图 1-1 复合材料的杨氏模量和使用温度范围
 FRR: 纤维增强橡胶; FRTP: 纤维增强热塑性塑料; FRP: 纤维增强热固性塑料; FRM: 纤维增强金属; FRC: 纤维增强陶瓷

下一代复合材料 作为复合材料的发展方向，下一代将是混杂复合材料 (HCM)。这种复合材料的特点是不局限于同一种纤维和同一种基体。为了满足对制品的各种要求，可以采用两种或两种以上的纤维作增强材料，与各种形态的基材组合起来，通过最佳材料设计，通过混合各种增强纤维来发挥各自的特点，使所制成的材料既能发挥各种纤维的优点，又能避开各自的缺点，做到取长补短，发挥出所需要的综合性能。因此，混杂复合材料正是复合材料的精髓——“复合思想”的体现与应用。“复合思想”为复合材料的进一步发展提供了强有力的指导思想与发展方向。

以纤维的发展为中心，按复合基体的种类和复合成形的方法，归纳出来的复合材料发展历史图如图1-2所示，该图还预示出了复合材料的发展方向。

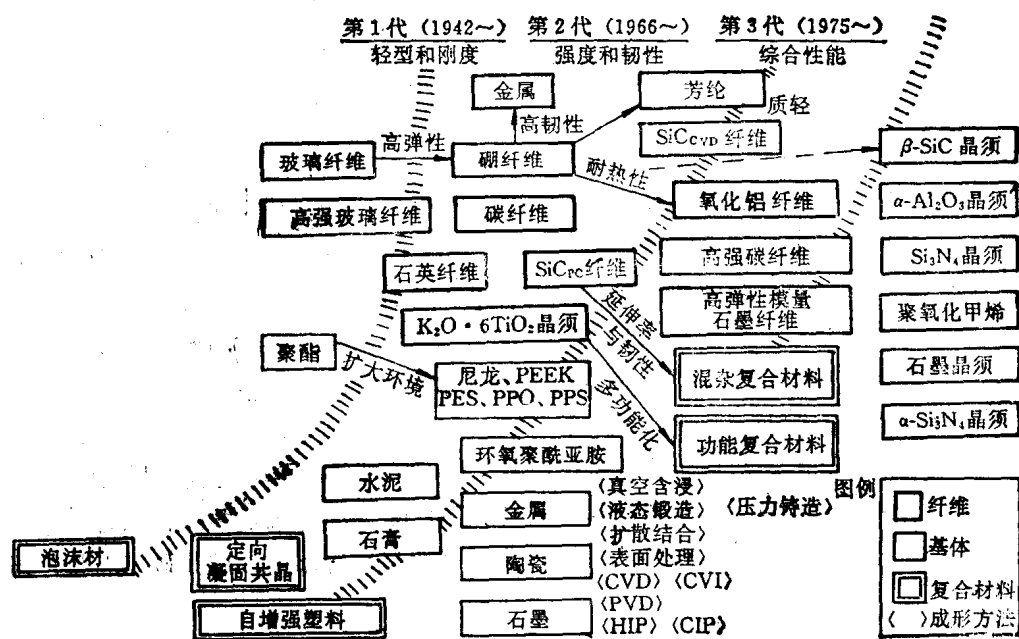


图1-2 复合材料的发展历史简图

1.3 复合材料的分类及其命名

1.3.1 复合材料的分类

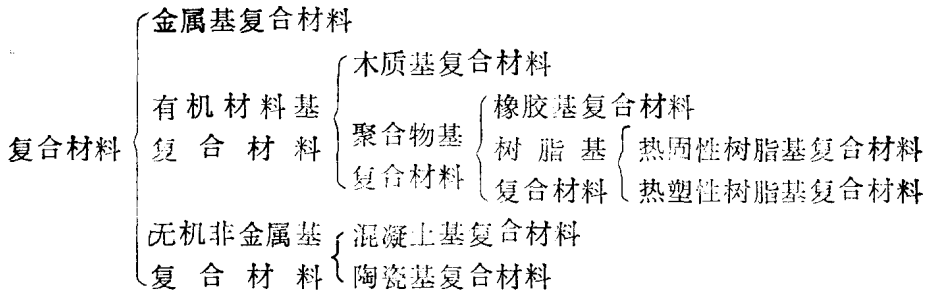
按复合材料的定义，纤维增强树脂、钢筋混凝土、石棉水泥板、层合板、轮胎、甚至包括泡沫塑料或多孔陶瓷（以气体为一相的材料）都是复合材料，这是广义的复合材料。但通常所说的复合材料是指狭义的复合材料，因为复合材料一词是在纤维增强树脂出现以后才广泛使用起来的，是指纤维增强树脂、金属和陶瓷复合材料的。为了对复合材料有一个全面的了解，本节介绍的是广义的复合材料的分类。

复合材料是由基体材料和分散材料（包括增强材料、填充材料、着色剂）等组分所组成。由于分散材料和基体不同，形态不同，复合方式及复合效果不同，可以有很多种分类方法，这里介绍的是常用的几种分类方法。

1.3.1.1 按组成组分的类型分类

A 按基体材料类型分类

基体材料分为金属材料、无机材料和有机材料三大类，各类里又可细分，这是最常用的分类方法，具体分类如下：

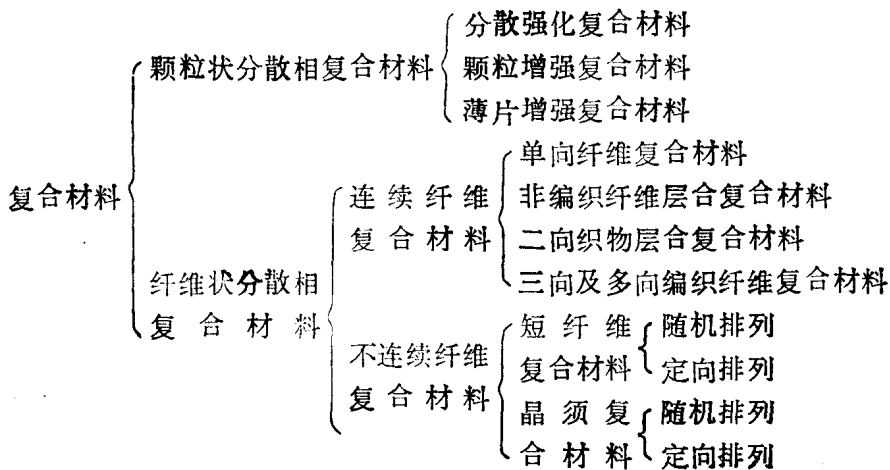


B 按分散材料（增强材料）类型分类

- (1) 无机非金属增强材料：如碳纤维增强复合材料、硼纤维增强复合材料等。
- (2) 金属增强材料：如钨丝增强高温合金复合材料、铁丝增强树脂复合材料等。
- (3) 有机纤维增强材料：如芳纶纤维增强环氧树脂复合材料、尼龙丝增强树脂复合材料等。

1.3.1.2 按分散材料（增强材料）的形态与排布方式分类

分散材料（增强材料）按其形状分有微粒子（零维的）、纤维（一维的）、箔或薄片（二维的）和蜂窝状物（三维的）。单丝纤维虽是一维的，但可以纺成纱、织成布（二维的）或编织成三维织物。纤维按长度分有连续的和连续的，按分布方式分又有定向排列和随机排列的……，情况是多种多样的，下面按分散材料（增强材料）的形状和排布方式的分类基本上能把上述各种情况包括进去。



1.3.1.3 按复合效果分类

按复合效果分类在一定意义上是指按使用用途分类的，可分为两大类：

- (1) 结构材料——力学型复合材料。力学型复合材料一般即指结构用复合材料，主要是各种纤维增强复合材料。
- (2) 功能材料——功能型复合材料。功能型复合材料是利用其力学性能以外的所有的其它性能的复合材料，有电气性能、磁性、光学性质、热力学性质、特殊力学性能、化学性能、放射性等多种功能复合材料。

综合基体与增强材料的类型、形态及功能等,可归纳成复合材料的种类,如表1-2所示。

表1-2 复合材料的种类

增强材料 \ 基体		有机材料	金属材料	无机材料	其他
零 维	有机材料	聚合物			
	金 属	防带电塑料	合金	超耐热硬质合金	
	无机材料	导电塑料 自润滑材料 橡胶	弥散强化合金 自润滑材料	陶瓷 结晶化玻璃 混凝土	
一 维	有机材料	ArFRP GF/尼龙 FRR		灰泥 木质 水泥	
	金 属	防带电地毯 BFRP	不锈钢/Al P/Al 超导丝 磁性材料 触点 W/高温合金	铁丝强化水泥 钢筋混凝土 原钢筋玻璃	电力电缆
	无机材料	GFRP CFRP 混合物复合材料	SiC/Al SiC _w /Al C/Al, C/Mg Al ₂ O ₃ /高温合金 多芯稳定化超 导线	玻璃纤维强化水泥 C/灰泥, C/水泥 石棉水泥 C/C复合材料 底板 垫圈	光通信纤维
二 维	有机材料	化妆板	装饰钢板 彩色铁板 抗振钢板 三明治型钢板	石膏 增强玻璃	
	金 属	Al-PE薄板 电路板	双金属 包层材料		
	无机材料		绝热涂层 表面处理	衬衬 约瑟夫森粒子	
三 维	有机材料	三维织物			
	金 属	三明治型材料 三维电路板	三明治型材料	半导体 IC, LSI	
	无机材料	三明治型材料 海绵材 混合物材料	三明治型材料 海绵金属	C/C复合材料 泡沫陶瓷 发泡水泥 发泡石膏 发泡玻璃 复合泡沫塑料	

注: 将碳、石墨列入无机材料类中。

1.3.2 复合材料的命名

复合材料的命名国内外都还没有一个统一的规定,共同的趋势是根据增强材料与基体材料的名称来命名复合材料,有三种情况。

- (1) 强调基体时则以基体为主,如金属基复合材料、聚合物基复合材料等。
- (2) 强调增强材料时则以增强材料为主,如碳纤维增强复合材料、氧化铝纤维增强复合材料等。
- (3) 基体与增强材料并用。这种命名法常用以指一种具体的复合材料,一般将增强材料名称放在前面,基体材料名称放在后面,最后加“复合材料”而成,如碳纤维增强铝

合金复合材料，为简化起见，常写成“C/Al复合材料”，即在增强材料与基体材料两个名称之间加一斜线，而后加“复合材料”来表示。

有时，人们还习惯使用商业名称，如我国把玻璃纤维增强树脂复合材料通称为“玻璃钢”。

1.4 金属基复合材料的发展史、种类及特性

1.4.1 金属基复合材料的发展史

非结构用金属基复合材料的历史较长。1920年就出现了贵金属包覆的电接点材料；第二次世界大战中出现了Al/Fe/Al代Ni作真空管的阳极；以后又出现了Al/Fe/Cu、Al/Fe/Cu/Fe/Al等层压金属材料；50年代出现了黄铜/钢/黄铜的硬币、铜包钢线、铝包钢线；70年代出现了铜包铝线等各种电线。

作为结构用金属基复合材料最早的可以算1923年发表的用粉末冶金法烧结出的WC-6%Co的碳化钨硬质合金，以后又研究了周期表第ⅣB族~ⅦB族金属的碳化物和Fe系金属(Fe、Co、Ni)的烧结合金，其特点是硬度非常高，以后统称为硬质合金。由于WC、TiC、TaC等颗粒硬度高，颗粒平均直径 $1\mu\text{m}$ 以上，容积比 V_v 高(可达90%)，主要是利用颗粒本身的硬度和强度，基体是起把颗粒结合在一起的作用，故称为颗粒增强金属基复合材料(PRM)。

1946年发明了烧结铝粉(SAP)，它是 Al_2O_3 微粒子在Al基体中微细分散的材料。以后以TD-Nicrome为首，相继开发出了Co-ThO₂、Cu-Al₂O₃、Pb-PbO等材料，这类材料的强化相多是氧化物，也叫氧化物分散强化(ODS)合金，其强化相的平均直径小于 $0.1\mu\text{m}$ ，体积比仅占百分之几，由于强化相阻止基体中位错运动而强化基体，故叫做分散强化(DS)金属基复合材料。

纤维增强金属基复合材料(FRM)的开发研究比纤维增强塑料晚20年，一是受纤维增强塑料和各种纤维相继开发出来的刺激，一是1948年美国贝尔电话公司由于通信事故偶然发现了猫的胡须现象，后来知道晶须的强度接近物质的理论强度。考虑到把纤维和晶须加到金属基体里可以提高金属的强度，从而开始了纤维增强金属的研究。1963年McDanel等发表钨纤维增强铜(W/Cu)复合材料的研究，以后又有SiC/Al复合材料和Al₂O₃/Ni复合材料的研究。但由于价格界面等棘手问题的制约而进展缓慢。1978年美国最先报导了B/Al复合材料在哥伦比亚号航天飞机上的应用；1982年日本丰田汽车厂最早把Al₂O₃·SiO₂/Al复合材料用于汽车活塞上，开创了金属基复合材料用于民品的先例；以后金属基复合材料的研制和开发工作便活跃起来了，以Al₂O₃/Al、SiC_(w)/Al、SiC_(p.c)/Al、C/Al、C/Mg等轻金属及合金复合材料研究得较多，还有热膨胀系数可调的C/Cu复合材料等。现在已开发出了多种铝基复合材料，在航天航空和汽车工业上已制成了多种结构件，还开发出了用于电子、仪表、光学仪器上的功能材料，国外已有公司企业将铝基复合材料投入生产。尽管目前在制造成本和工艺上还存在一些问题，但由于航空航天部门推进器系统使用的材料(各种高温合金、钛合金、高强度钢和铝合金)的工作性能已达到了极限，因此研制工作温度更高、比刚度和比强度大幅度增加的金属基复合材料已成为发展高性能结构材料的一个重要方向。

纤维增强金属基复合材料按制造方法可分为两大类：一是将纤维掺入基体中的人工合