

783010

5(3)321

0845

《现代科技译丛》 材料丛书

# 复合材料概论

许世杰 编译

大连铁道学院图书馆

# 复 合 材 料 概 论

许世拯 编译

大 连 铁 道 学 院 图 书 馆

责任编辑：李建华

### 复 合 材 料 概 论

编辑：大连铁道学院《现代  
科技译丛》编委会

出版：大连铁道学院图书馆

印刷：庄河印刷厂

1.30

## 编者的话

通过“复合”的方法研制新型材料，已成为世界各国科学技术界关注的一大问题。它正在涉及塑料、橡胶、金属、陶瓷、混凝土、木材、沥青等广泛材料领域内的研究开发。由于复合材料可以根据发挥某一材料的长处，避其弱点的要求进行设计，既能充分利用资源，又可节能。因此，各国都把复合材料看成是极有发展前途的一种新型材料，特别是高性能复合材料将成为今后新型材料的重要生长点。目前，我国也已开始进行复合材料的研究和推广应用，为了向工科大学生、研究生和从事材料研究的工程技术人员介绍复合材料的基本知识和国外学者的一些研究成果，特编译出版这本小册子，供有关同志参考。

本书主要取材于下列书刊：

- 1、复合材料技术集成，牧广、岛村昭治等编集〔产业技术世〉夕一〕1976年出版
- 2、“未来を拓く先端材料”岛村昭治编著，“工业调查会”1982年出版。
- 3、“复合材料のはなし”岛村昭治著“产业图书株式会社”1982年出版
- 4、“日本复合材料学会志”（1984年第4期）
- 5、“复合材料进展”（C皮亚蒂编赵渠森、伍临尔译，吴洁校，科学出版社1984年出版）

限于编者水平，并由于有关复合材料的技术用语尚缺少统一规定，编译中难免有欠准确之处，还望读者批评指正。

许世拯

1986年3月于大连

# 目 录

1、复合材料的分类和发展趋势	2
1.1 复合材料的种类	2
1.2 复合材料的历史	6
2、塑料基复合材料	9
2.1 塑料基复合材料发展的背景	9
2.2 塑料基复合材料的应用	11
2.21 宇航	12
2.22 飞机	13
2.23 汽车	14
2.24 舟艇	14
2.25 海洋开发	15
2.3 塑料基复合材料的分类	15
2.4 塑料基复合材料的制造法	17
2.41 手工叠层成形法	17
2.42 喷射成形法	17
2.43 热压成形法	17
2.44 挤压成形法	17
2.45 长纤维绕卷法	18
2.46 拉拔成形法	13
2.5 纤维增强塑料的特性	19
2.6 薄膜贴合制品	19

<b>3、金属基复合材料</b> .....	23
3.1 金属基复合材料的分类.....	24
3.2 纤维增强.....	24
3.21 纤维增强金属基复合材料制造工艺 上的两大难点 .....	25
3.22 制造方法 .....	26
3.221 以金属箔作基体材料的制造法.....	26
3.222 纤维上预先涂覆基体金属的制造法.....	27
3.223 粉末冶金法.....	27
3.23 各种纤维增强金属的强度 .....	27
3.3 贴 合.....	29
3.4 被 覆.....	29
3.5 粒子充填强化.....	30
3.6 粒子弥散强化.....	30
3.61 表面氧化法 .....	31
3.62 共同沉析法 .....	33
3.63 机械合金 .....	33
3.7 粒子强化.....	33
3.8 定向凝固.....	34
3.9 功能型复合材料.....	35
3.91 吸振铁素体板 .....	35
3.92 耐磨合金 .....	36
3.93 集电子材料 .....	36
<b>4、陶瓷基复合材料</b> .....	37
<b>5、碳纤维增强碳基复合材料 (C/C)</b> .....	39
5.1 C/C的制造方法.....	39

5.2 C/C的特性	41
5.21 机械性能	41
5.22 热特性	48
5.3 C/C的应用	52
5.31 火箭喷嘴	53
5.32 宇宙飞船	53
5.33 制    动	54
5.34 汽轮发动机及其他	54
5.35 生体材料	55
<b>6、纤    维</b>	<b>55</b>
6.1 纤维的分类	56
6.2 各种纤维的生产和性能	57
6.21 玻璃纤维 (G、F)	57
6.22 硼纤维 (B、F)	61
6.23 碳纤维 (C、F)	65
6.24 碳化硅纤维 (SCF)	70
6.25 定向有机纤维 (芳纶、AF)	71
<b>7、晶    须</b>	<b>74</b>
7.1 金属晶须	76
7.2 无机化合物晶须	79
7.21 碳化硅晶须	79
7.22 氧化铝晶须	80
7.23 石墨晶须	82
<b>8、粘附和界面</b>	<b>83</b>
8.1 界面的物理化学特性	83
8.11 表面和界面结构及其活性	83

8.12 粘附的界面化学 .....	86
8.13 界面的相容性和粘附 .....	89
8.14 粘附的速度过程 .....	91
8.2 界面结合和反应 .....	92
8.21 界面结合的类型 .....	92
8.22 界面和化学反应 .....	93
8.3 粘附的流变学 .....	94
8.31 粘附界面的变形和断裂 .....	94
8.32 粘附的经时变化 .....	104
8.33 粘附的耐久性 .....	107
<b>9、 复合材料的设计</b> .....	<b>115</b>
9.1 复合材料的特性 .....	115
9.2 基本的设计程序 .....	117
9.3 设计步骤 .....	118
9.31 单元组分、材料、结构和工艺之间的关系 .....	118
9.32 应力状态的确定 .....	120
9.33 强度准则 .....	123
9.34 常用的叠层 .....	126
9.35 金属基复合材料的设计方法 .....	127
9.4 统计设计 .....	128



## 引 言

材料是制造各种元件的基础，没有好的材料就不可能制造出好的物品。直到最近，新技术开发没有按照人们所希望那样开发的一个重要原因，就是没能研制成功与之相适应的新型材料。正因为如此，近来对新材料的开发呼声越来越高，材料科学、材料工程这个新兴学科也越来越被人们重视，有关新型原材料，超级材料等等的报导也越来越多。

复合材料就是其中的一种，以美国1942年研制成功的玻璃纤维增强塑料（玻璃钢）为标志而登场的这种新型材料，引起了世界各国科学技术界的极大兴趣，四十多年来得到了很大的发展，从提高玻璃纤维的弹性模量，到开发新的纤维如硼纤维、碳纤维，直到比强度更高的有机系的氧化铝纤维、耐热性高的芳纶（Kevlar），另一方面，为了扩大复合材料的应用范围，从改善树脂的耐热性能开始，进而研究以金属为基体的复合材料，以及以陶瓷等无机材料为基体的复合材料，由于复合材料具有其它材料所无法比拟的优越性能，所以不少科学家预言下一世纪将是复合材料的世纪，复合材料在工业材料中，将逐步占据主导地位。

我国的复合材料研究，起步较晚，目前玻璃纤维增强塑料（玻璃钢）已在工业生产中得到应用，其他如碳纤维增强塑料以及金属基复合材料等还处于实验研究阶段，需要我们加倍努力，尽快赶上世界先进水平。

# 1 复合材料的分类和发展趋势

## 1.1 复合材料的种类

复合材料的广义解释可表述如下：由不同的材料组合制成的材料中，仍然明显地显示出原有材料的各自特性，同时，通过复合化产生原有材料所不可能具备的新的功能，简单地说，即：由具有A特性的材料和具有B特性的材料组合制成的复合材料的特性X可以表示为：

$$X=f(A, B) \quad (1)$$

举一个简单的例子，通过纤维的单向排列而增强的材料的弹性模量E，可由纤维和基体材料的弹性模量以及它们的比例，通过如下公式计算求得：

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2)$$

式中的下标c、f、m，分别表示复合材料、纤维和基体材料， $V_f$ 是纤维的体积含有率。以上关系称为复合法则 (Rule of Mixture)，因此，如加入具有大弹性模量的纤维，象塑料那样软材料也能具有象金属那样的弹性模量，此外，由公式(2)可知，通过选择适当的组分材料及其数量，即可自行设计获得具有所需特性的新材料。

当然，通过复合必然使制成的材料增加新的特性C。

对于冶金工程师来说比起：

$$A+B=C$$

必定更希望：

$$A+B=A+B+C$$

特别对于后叙的功能性复合材料，更加注重于通过界面效应等因素获得有用的新的特性C。

表1.1 复合材料的种类 (碳、石墨属无机)

基体		有机材料	金属材料	无机材料	其他
分散	材				
零次元	有机材料				
	金属	绝缘塑料	粉末冶金 (FeCu)	金属陶瓷	
	无机材料	导电塑料	分散强化合金 自我润滑材料	陶瓷 混凝土	结晶化玻璃
一次元	有机材料	芳纹环氧树脂		灰浆 木质水泥	
	金属	绝缘板  BFRP	不锈钢/Al  B/Al 超导体导线 超导材料 磁融点 W/超合金	铁丝强化水泥 钢筋混凝土	加钢玻璃 电缆
	无机材料	GFRP CFRP	Sie/Al C/Al Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /超合金	玻璃纤维强 化水泥 C/灰浆 石棉浆 泥垫圈	光通讯纤维

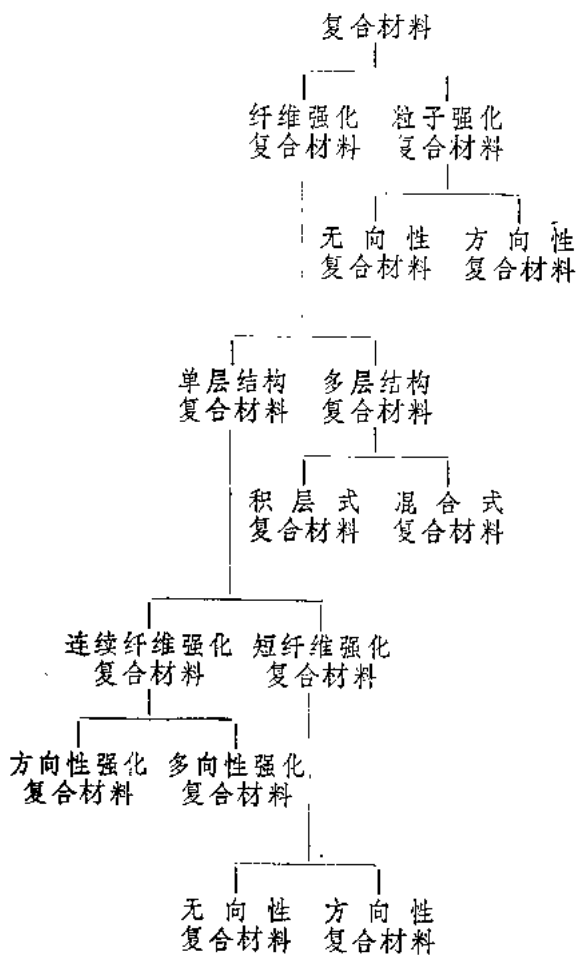
续表 1.1

分	基本 散材	有机材料	金属材料	无机材料	其他
二 次 元	有机材料	装饰板	装饰钢板 彩色铁板 防锈钢板	石膏板	强化玻璃
	金属	Al-PE薄板 电路板	双金属包层材 金属材料		
	无机材料		隔热覆盖层 表面硬化	制动器衬里	
三 次 元	有机材料	三次元编织物			
	金属	层状材料 三次元电路板	层状材料	半导体 IC	
	无机材料	层状材料 薄膜混合材料	层状材料 金属膜	陶瓷模 发泡水 发泡石膏	泡沫玻璃

复合材料由于处理方法不同而略有区别，从在塑料中加入填料剂，到使用碳纤维和氧化铝纤维的FRP（纤维增强塑料）以至由碳、玻璃组合的混合体等，此外，由于基体材料和其他组分材料的大小、形状不同而千差万别。

表 1.1 中表示复合材料根据组分材料的种类和形态而分类的情况。

表1.2 复合材料按强化材料的分类



## 1.2 复合材料的历史

复合材料是一种既古老又新颖的材料。如果追溯历史，就可发现古代埃及人用于修造房屋墙壁的土坯中，就渗杂有切碎的稻草或茎，以提高土坯的强度，这实际上就是今天所说的纤维增强的思想。这样制成的土坯就是一种原始的复合材料。举世闻名的日本奈良唐招提寺的鉴真和尚像是用乾漆制成的，所谓乾漆，就是用浸透漆液的麻布，一层层贴合而成的，这也是一种古老的复合材料。

现代的复合材料是以玻璃纤维增强塑料问世为标志，以后，为了提高复合材料的性能，扩大应用范围，从研制具有更高弹性模量和强度的新型纤维材料（碳纤维，硼纤维，氧化铝纤维和芳纶(kevlar)等)以改善塑料的耐热性，到研究开发以金属为基体的复合材料。从1981年开始实施的日本通产省“下世纪产业基础技术”规划中，对复合材料提出的最终目标是：纤维增强塑料在250℃高温下，抗拉强度达240kg/mm<sup>2</sup>以上，纤维增强金属基复合材料处在450℃的高温下，抗拉强度达150kg/mm<sup>2</sup>以上，目前，这一计划正在取得进展。

此外，单向凝固的共晶合金也具有好的耐高温性能。以陶瓷等无机材料做为基体材料也得到重新评价，在这方面研制出的新型复合材料有绝热隔音的新型建筑材料，耐热瓦（航天飞机的耐热覆盖物）等等。

如果以玻璃纤维强化聚酯为第一代复合材料的话，那么CFRP（碳纤维增强塑料），BFRP（硼纤维增强塑料）就是第二代，而FRM（纤维增强金属）可能成为第三代复合

材料。

晶须是一种接近理论强度的完全结晶体，如能很好地使用，估计可制成强度高达数百~数千 $\text{kg}/\text{mm}^2$ 的复合材料，但目前还未研制成功。

还有一种复合材料叫做功能复合材料，它的历史比结构复合材料更早，例如：为了提高耐蚀性能而进行涂镀等表面处理，将一个个微粒绝缘压固制成的压粉铁心和磁带，将磁性体针状粉末和非磁性体混合制成的永久磁石等等。

今后复合材料发展的一个重要方向是智能材料，所谓智能材料就是能够将根据外部给予的刺激，自动改变材料自身的性能与变化了的环境相适应，例如人们曾经设想研制出能自动产生硬块的复合材料，初生婴儿的脚底板本是完全柔软的，但随着幼儿开始走路，脚跟自然地变硬，多数人的中指的第一个关节的略上部，面向食指一侧有一个硬块，因为这个部分经常接触钢笔和铅笔杆，为了能承受它们给予的刺激而生成的，越是写字多的人这个硬块也越大。能不能模仿人体的这种功能，制成具有这种特性的人工材料呢？看来这个理想有可能由复合材料来实现，目前做为纤维增强塑料的基体材料而广泛使用的不饱和聚酯可在常温、常压下固化，但必须借助于反应引发剂（过氧化苯甲酰等）和促进剂（环烷酸钴等），但是树脂只和此二者之一混合仍不能固化，利用这种化学反应的特点，把树脂与引发剂（R+C）的混合物和树脂与促进剂（R+P）的混合物分别装入两种微型胶囊A、B中，（R为树脂，C为引发剂，P为促进剂）如图1.1所示，将微型胶囊A、B混合装入希望变压后变硬的部位，而其他部份均由柔软的橡胶制成，在不改变任何外部刺

激的情况下,小胶囊A、B中的树脂均不能固化,所以,材料的整体都是柔软的,当如图(b)所示,向一个部位施加压力时,附近的微型胶囊破裂,A和B中的混物流出相互混合,发生如前述那样的固化反应,其结果如(c)所示,橡胶体的一部分变硬。

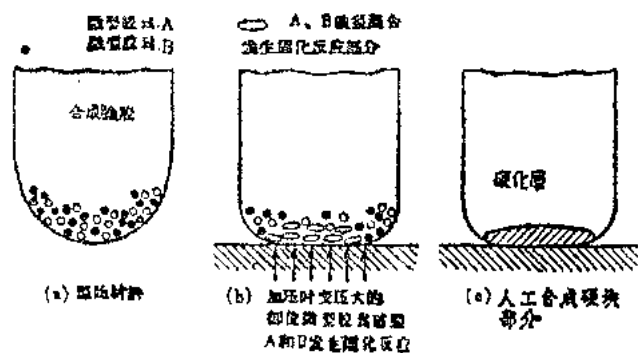


图1.1 可生成硬块的人工材料



## 2 塑料基复合材料

### 2.1 塑料基复合材料发展的背景

图2.1 表示自1909年生产出酚醛树脂以来，到今天研制出的各种主要塑料的抗拉强度大小。

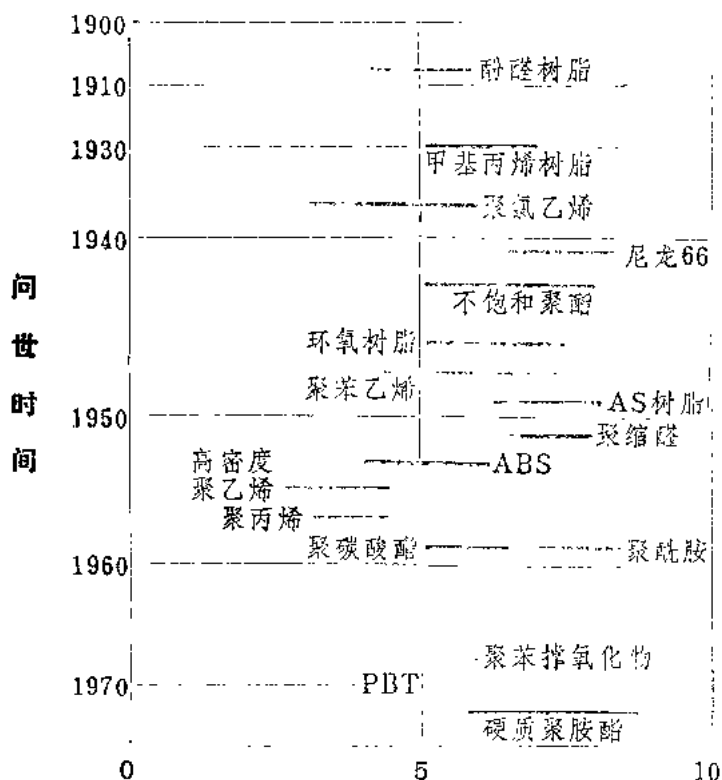


图2.1 各种树脂的问世时间和强度

由图可知，在塑料发展的约七十年间，它的抗拉强度几乎没有增加，每平方毫米在5~7公斤之间。表示受力时交