

机械 工程 材料 丛书

# 复 合 材 料

魏月贞 主编



机械工业出版社

本书讲述了复合材料的基本概念、基本理论；各类复合材料的性能、简单的成型工艺及应用，其中包括树脂基复合材料、金属基复合材料及陶瓷基复合材料。重点介绍结构件用复合材料，简单介绍各类功能复合材料。

本书是工科院校非材料专业学生的教学参考书，也可供机械工程行业的中、高级技术人员使用。

## 复 合 材 料

魏月贞 主编

\*

责任编辑：张蒿玲

封面设计：刘 代

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  · 印张  $7\frac{1}{4}$  · 字数 159 千字  
1987 年 8 月北京第一版·1987 年 8 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,150 · 定价：1.55 元

\*

统一书号：15033·6866

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第一章 概述 .....                | 1   |
| § 1-1 复合材料的发展简史 .....       | 1   |
| § 1-2 复合材料的定义、命名和分类 .....   | 3   |
| § 1-3 复合材料的特性 .....         | 8   |
| 第二章 复合材料的基础理论及简单的设计知识 ..... | 13  |
| § 2-1 复合材料的界面效应 .....       | 13  |
| § 2-2 复合材料设计的简单原则 .....     | 28  |
| 第三章 增强材料 .....              | 34  |
| § 3-1 概述 .....              | 34  |
| § 3-2 有机纤维增强材料 .....        | 35  |
| § 3-3 无机纤维增强材料 .....        | 40  |
| § 3-4 粒子增强材料 .....          | 62  |
| § 3-5 增强材料的表面处理 .....       | 64  |
| 第四章 热固性树脂基复合材料 .....        | 70  |
| § 4-1 概述 .....              | 70  |
| § 4-2 热固性树脂基体 .....         | 70  |
| § 4-3 热固性树脂基复合材料的基本性能 ..... | 84  |
| § 4-4 热固性树脂基复合材料的成型方法 ..... | 89  |
| 第五章 热塑性树脂基复合材料 .....        | 110 |
| § 5-1 概述 .....              | 110 |
| § 5-2 热塑性树脂基体 .....         | 111 |
| § 5-3 热塑性树脂基复合材料的性能 .....   | 126 |
| § 5-4 热塑性树脂基复合材料的成型加工 ..... | 133 |
| 第六章 金属与陶瓷基复合材料 .....        | 135 |

## VI

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| § 6-1 概述 .....                          | 136 |
| § 6-2 纤维增强金属基复合材料 .....                 | 137 |
| § 6-3 层压金属基复合材料 .....                   | 146 |
| § 6-4 陶瓷基复合材料 .....                     | 150 |
| 第七章 特种复合材料 .....                        | 152 |
| § 7-1 烧蚀材料——碳/碳复合材料 .....               | 152 |
| § 7-2 导电复合材料 .....                      | 156 |
| § 7-3 固体自润滑复合材料及耐磨复合材料 .....            | 157 |
| § 7-4 光学功能复合材料 .....                    | 158 |
| § 7-5 阻燃及自熄性复合材料 .....                  | 160 |
| 第八章 复合材料的应用 .....                       | 163 |
| § 8-1 航天和航空工程上的应用 .....                 | 163 |
| § 8-2 船舶工程上的应用 .....                    | 170 |
| § 8-3 车辆制造工业上的应用 .....                  | 172 |
| § 8-4 建筑工程上的应用 .....                    | 174 |
| § 8-5 电器设备上的应用 .....                    | 175 |
| § 8-6 化学工程上的应用 .....                    | 178 |
| § 8-7 兵器工业上的应用 .....                    | 180 |
| § 8-8 医学、体育上的应用 .....                   | 181 |
| § 8-9 其它方面的应用 .....                     | 182 |
| 第九章 复合材料的展望 .....                       | 184 |
| § 9-1 复合材料发展的前景 .....                   | 185 |
| § 9-2 发展我国复合材料应该注意的几个问题 .....           | 190 |
| 主要参考资料 .....                            | 195 |
| 附录 .....                                | 196 |
| 一、常用复合材料及工程塑料性能表 .....                  | 196 |
| 二、复合材料常用缩写代号 .....                      | 222 |
| 三、应力、压力换算表及用于构成十进倍数和分数单<br>位的部分词头 ..... | 225 |

# 第一章 概 述

## § 1-1 复合材料的发展简史

近三十年来，科学技术飞速发展，世界上出现了一批新的技术和相应的产业，被称为“世界新技术革命”。这些新的技术群，包括信息技术、生物技术、新型材料技术、新能源技术、空间技术、海洋开发技术等，集中体现了世界科技发展最新成就，在世界范围内产生了巨大影响。就这些新的技术群而言，材料则是一切技术的物质基础。

人类的生活、生产的实践、对材料不断地提出新的要求。新材料的出现又推动着人们生活、生产的进一步发展。由于人类在科学技术上的进步总是与新材料的出现和使用密切相关，于是人类就习惯用材料作为历史分期来表征文明进步的程度。如“石器时代”、“铜器时代”、“铁器时代”、“塑料时代”等。当前，人们又正在利用化学、物理和其它现代科学技术的新成就，一方面不断地发现新原料，探索制造新材料，另一方面利用现有材料，采用一系列技术处理，把两种或两种以上的原材料组合起来创造出性能优异的“复合材料”。性能多种多样的这类新型材料，不断地满足着科学技术发展对材料性能越来越苛刻的要求。可以预言，如果今后仍沿用材料作为历史分期的依据，那么，未来的二十一世纪将是“复合材料”的时代。

二十一世纪将是“复合材料”时代的预言，意味着到了2000年，人们的衣、食、住、行以及科学技术的发展都将离

不开复合材料，而且复合材料按每人每年平均用量将超过其它一切材料。

实际上，就两种或两种以上不同物质组成的材料称为复合材料而言，人们与它的接触已经有几千年的历史了。我国西安东郊半坡村的仰韶文化住房的遗址，说明我国劳动人民早在公元前二千多年就开始用草和泥土组成的复合材料来建造住房的四壁、屋顶和地面。十年前在长沙发掘出的马王堆汉墓，是公元前一百八十多年留下的祖国遗产，其中出土的大量漆器，有盛装饮料食品的各种鼎、钵、盒及壶等，式样应有尽有，品种达二十多种。工艺精巧，色泽鲜艳，光亮如新。这些漆器基本上可以认为是由麻丝、麻布等天然纤维为增强材料而以大漆为基体所制成的复合材料。同期也已经有了用大漆、木粉、泥土、麻布等组成的复合材料塑造寺庙的佛像。这类塑像体积大，重量轻，质地坚韧，耐久性强，类似于近代的增强复合材料。还有在湖北武汉军事博物馆展出的三国初期吕布曾用过的兵器“殳”。其杆近四米长，材质是以木为芯，纵向铺设竹丝，环向缠绕丝质纤维，其设计思想可谓已达近代复合材料的设计水平。据国外资料报导，在公元前一千五百年，埃及用火胶制成木材层压板。据说印度用这种胶合板已有三千年历史。中东地区在公元前也出现了用沥青粘接芦杆制造渔船的技术。

但是近代复合材料的发展却是近几十年的事。由于航空、宇航、原子能、电子工业及通讯技术的发展，要求材料除具有高强度、高模量、耐高温等性能外，还对材料的比重、韧性、耐磨、耐蚀、光、电等性能提出了种种要求。更特殊的一些产品要求材料具有一些相互矛盾性能，如导电而要绝热，强度、弹性模量要高而比重要小。这些性能对于单一

材料来说往往是满足不了的，于是就想把一些不同性能的材料组合起来，取长补短。这些愿望到了二十世纪才有了实现的可能，因为二十世纪正值合成聚合物（合成树脂）的大量开发和实现了商品化，各种人工制造的无机及有机增强材料如玻璃纤维、碳纤维、聚芳酰胺（芳纶）纤维等不断问世，于是就出现了现代的复合材料。

现代复合材料中出现得较早，至今使用得最广，占主要地位的合成树脂基复合材料的发展历史如表 1-1 所示。

表1-1 合成树脂基复合材料发展史

| 年 代  | 复合材料名称               |
|------|----------------------|
| 1909 | 酚醛树脂复合材料             |
| 1928 | 尿醛树脂复合材料             |
| 1938 | 三聚氰胺甲醛复合材料           |
| 1942 | 玻璃纤维增强聚酯             |
| 1946 | 环氧树脂复合材料<br>玻璃纤维增强尼龙 |
| 1951 | 玻璃纤维增强聚苯乙烯           |
| 1956 | 酚醛-石棉耐磨复合材料          |
| 1964 | 碳纤维增强复合材料            |
| 1965 | 碳纤维增强复合材料            |
| 1969 | 碳/玻璃杂化纤维增强复合材料       |
| 1970 | 芳香聚酰胺/碳杂化纤维增强复合材料    |

合成树脂基复合材料有很多优点，解决了很多具体问题，但是它们耐热性差，于是纤维增强金属、陶瓷等复合材料在六十年代以后也相继有所发展，目前仍处于研究发展之中。

## § 1-2 复合材料的定义、命名和分类

### 一、复合材料的定义

复合材料自古至今虽有几千年的发展历史，近代复合材

料研究工作又极为活跃，而且有着广阔的发展前途，但关于复合材料的理论研究尚不成熟，因此到目前为止，没有充分理论根据来正确而严格地给复合材料下个科学定义。国内外对复合材料的定义和解释都有所不同。

国际标准化组织曾在塑料名词术语的定义中，把复合材料定义为：“由两种以上物理和化学上不同的物质组合起来而得到的一种多相体系”；有人认为：“两种或两种以上不同化学性质或不同组织相的物体，以微观或宏观形式组合而成的材料均可称为复合材料”；又有人认为：“有连续相的基体（如聚合物-树脂、金属、陶瓷等）与分散相的增强材料（如各种纤维、织物及粉末填料等）组合的多相材料称为复合材料”。总之，不管有多少种说法，有两点是共同一致的：复合材料应该是多相体系；而且它们的组合必须有复合效果，即复合材料具有组成材料相互取长补短的良好综合性能。

从各种论述的具体情况来看，复合材料的含义有两种：广义的指由两个或多个物理相组成的固体材料。例如纤维增强聚合物、钢筋混凝土、石棉水泥板、橡胶制品、三合板等，甚至包括泡沫塑料或多孔陶瓷等以气体为一相的材料。狭义的指用高性能玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、芳纶纤维等增强的塑料、金属和陶瓷材料。本书重点讲述各种纤维增强的近代复合材料及部分功能复合材料。

## 二、复合材料的命名

国内外至今对复合材料没有统一的命名法。当前一个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，如树脂基复合材料，金属基复合材料等。

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、玻璃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，如碳纤维与环氧树脂组成的复合材料，可命名为“碳纤维环氧树脂复合材料”，有时也叫“碳纤维增强环氧树脂复合材料”。为简化起见，常常写成“碳/环氧复合材料”，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”。

有时，人们还习惯用一些通俗名称，例如玻璃纤维增强的复合材料通称为“玻璃钢”，因为玻璃纤维增强树脂复合材料，它的一些力学性能可与钢材比美而得名。树脂是塑料的主要成分，因此树脂基复合材料又称之为增强塑料，如玻璃纤维增强塑料，碳纤维增强塑料等。塑料通常为各向同性材料，而纤维增强复合材料往往是各向异性的，一般应把短纤维或粉末增强材料称之为增强塑料更为合理。

### 三、复合材料的分类

复合材料的分类，至今也不统一，一般有以下几种：

#### (一) 按组成的组份类别进行分类

复合材料由基体和分散材料（增强材料）等组份所组成，不同基体及不同分散材料可以组成不同的复合材料，以广义复合材料作典型的分类见表1-2。

把表 1-2 内的分类概括起来可写成：

#### 1. 按基体材料类型分类

(1) 聚合物（树脂）基复合材料：如芳纶/环氧复合材料、碳纤维/酚醛复合材料等。

(2) 无机非金属基复合材料：如钢丝/水泥复合材料、

表1-2 复合材料按组分进行分类(广义复合材料)

| 分散材料    | 基体                        | 金属材料         | 无机非金属材料 |                     |              | 有机材料               |             |            |                              | 其它          |
|---------|---------------------------|--------------|---------|---------------------|--------------|--------------------|-------------|------------|------------------------------|-------------|
|         |                           |              | 陶瓷      | 瓷                   | 水泥           | 木                  | 树脂(塑料)      | 橡胶         |                              |             |
| 金属材料    | 金属材料                      | FRM          | FRC     | 玻璃钢<br>夹网玻璃<br>金属陶瓷 | 钢筋混凝土        |                    | FRP         | 轮胎<br>橡胶弹簧 | 玻璃纤维<br>增强<br>碳纤维<br>增强<br>碳 | C-C<br>复合材料 |
|         |                           | 包覆金属         |         |                     |              | PE-Al 复合<br>膜夹网波纹板 |             |            |                              |             |
|         |                           | FRM          | FRC     | GRC                 |              | FRP                |             |            |                              |             |
|         |                           | 弥散强化金属       | 压电陶瓷    |                     | 树脂混凝土        | 乳胶水泥               |             |            |                              |             |
| 无机非金属材料 | 玻璃、陶瓷<br>水泥<br>碳、石墨<br>其它 |              |         |                     |              |                    | CFRP        | 碳黑增强<br>轮胎 |                              |             |
|         |                           |              |         |                     | 石棉胶合板        |                    |             |            |                              |             |
|         |                           |              |         | 石棉水泥板               |              |                    |             |            |                              |             |
|         |                           |              |         | 水泥刨花板               |              | WPC                |             |            |                              |             |
| 有机材料    | 树脂<br>(塑料)<br>橡胶          | Al-PE<br>复合膜 |         |                     | 装饰板<br>(WPC) | 合成皮革<br>复合薄膜       |             |            |                              |             |
|         |                           |              |         |                     |              |                    |             |            |                              |             |
|         |                           |              |         |                     |              |                    |             |            |                              |             |
|         |                           |              |         |                     |              |                    |             |            |                              |             |
| 其它      |                           |              |         |                     |              |                    | 泡沫塑料人<br>造革 | 橡胶布        |                              |             |

表中: FRM——纤维增强金属      FRP——纤维增强塑料      FRC——纤维增强陶瓷      WPC——木材塑料复合材料

(书内所有名称缩写符号均请参看附录一)

碳纤维/陶瓷复合材料等。

(3) 金属基复合材料：如石墨纤维/铝复合材料等。

## 2. 按分散材料(增强材料)类型分类

(1) 无机非金属增强材料：如石墨纤维/陶瓷复合材料、硼纤维/金属复合材料等。

(2) 金属增强材料：如钨丝/高温合金复合材料、铁丝/树脂复合材料等。

(3) 有机纤维增强材料：如芳纶/环氧复合材料、尼龙丝/树脂复合材料等。

## 3. 同质物质组合的复合材料：如碳/碳复合材料。

### (二) 按复合效果进行分类

复合材料的复合效果就在于综合利用它们原组成材料的力学性能及其它功能性，因此，复合效果的目的，就在于加强其使用性能。材料品种各种各样，但从使用上区分，大致也只有两大类：结构材料是主要使用它们的力学性能，而功能材料是使用它们的声、光、电、热等的功能效应。因此，按复合效果分类在一定意义上犹如按材料用途分类。由此可分为：

#### 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，例如各种纤维增强复合材料。如碳纤维/环氧复合材料，玻璃纤维/酚醛复合材料等。

#### 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其它性能的复合材料。功能型复合材料如碳/碳耐热复合材料、雷达用玻璃钢天线罩就是具有良好透过电磁波的功能复合材料。除此之外，还有导电塑料、光导纤维等。

### § 1-3 复合材料的特性

近代复合材料的发展为时不长，人们对它的认识和了解还是很不充分的，根据初步总结，复合材料有下列特性：

#### 一、比强度和比模量高

强度和弹性模量与密度的比值称为比强度和比模量，它们是度量材料承载能力的一个重要指标。从表 1-3 所列的数据可以看到，与金属材料相比，纤维增强复合材料就有着好得多的比强度与比模量。

表1-3 常用材料和纤维复合材料的比强度与比模量

| 材料名称              | 密度<br>$\text{g/cm}^3$ | 抗拉强度              | 拉伸弹性模量            | 比强度                                   | 比模量                                   |
|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                   |                       | $10^8 \text{MPa}$ | $10^5 \text{MPa}$ | $10^6 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ | $10^8 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ |
| 钢                 | 7.8                   | 1.03              | 2.10              | 0.13                                  | 0.27                                  |
| 铝                 | 2.8                   | 0.47              | 0.75              | 0.17                                  | 0.26                                  |
| 钛                 | 4.5                   | 0.96              | 1.14              | 0.21                                  | 0.25                                  |
| 玻璃钢               | 2.0                   | 1.06              | 0.40              | 0.53                                  | 0.21                                  |
| 高强碳纤维/环氧<br>复合材料  | 1.45                  | 1.5               | 1.40              | 1.03                                  | 0.21                                  |
| 高模石墨纤维/环<br>氧复合材料 | 1.6                   | 1.07              | 2.40              | 0.67                                  | 1.5                                   |
| 芳纶/环氧复合材<br>料     | 1.4                   | 1.40              | 0.80              | 1.00                                  | 0.57                                  |
| 硼纤维/环氧复合<br>材料    | 2.1                   | 1.38              | 2.10              | 0.66                                  | 1.00                                  |
| 碳纤维/铝复合材<br>料     | 2.65                  | 1.00              | 2.00              | 0.38                                  | 0.75                                  |

## 二、抗疲劳性能好

疲劳破坏是材料在交变载荷作用下，由于裂缝的形成和扩展而形成的低应力破坏。大多数金属材料的疲劳破坏极限是其拉伸强度的40~50%，而碳纤维树脂复合材料则达70~80%。详见图1-1。

此外，纤维增强复合材料抗声振疲劳性能也是很好的。

## 三、减振性能良好

结构的自振频率除与结构本身形状有关外，还与材料的比模量的平方根成正比。复合材料具有高的比模量，因此也具有高的自振频率，高的自振频率就不易引起工作时的共振，这样就可避免因共振而产生的早期破坏。同时，复合材料中纤维及基体间的界面具有吸振能力，因此它的振动阻尼很高。对相同形状和尺寸的梁共同进行振动试验，即轻合金梁与碳纤维复合材料的梁同时起振，前者需要9 s才能停止振动；而复合材料的梁只需2.5 s就静止了。图1-2表示了这两种材料的振动衰减特性。

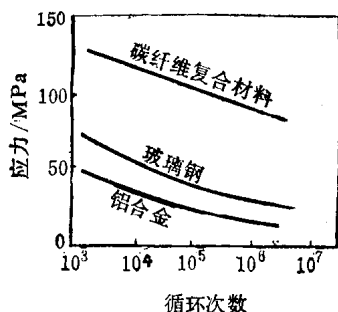


图1-1 三种材料的疲劳性能

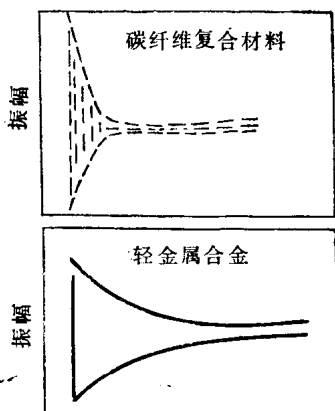


图1-2 两种材料的振动衰减特性

#### 四、破损安全性好

纤维增强复合材料基体中有大量独立的纤维，这类材料的构件一旦超载并发生少量纤维断裂时，载荷会重新迅速分配在未破坏的纤维上，从而使这类结构件不致于在极短时间内有整体破坏的危险。

#### 五、耐热性能好

树脂基复合材料的耐热性一般都要比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。例如一般铝合金在  $400^{\circ}\text{C}$  时，其弹性模量就会大幅度下降几乎接近于零，强度也显著下降。而用碳或硼纤维增强的铝，在这个温度下，其强度或弹性模量基本不变或稍有下降，见图 1-3。

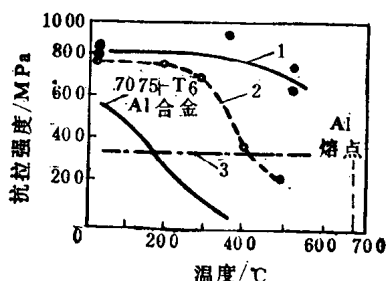


图1-3 纤维增强后的铝的高温强度

| 曲线号 | 纤维                      | 纤维体积分量/% | 制 法       |
|-----|-------------------------|----------|-----------|
| 1   | B                       | 45       | 等离子喷涂     |
| 2   | $\text{SiO}_2$          | 50       | 拉制、热压     |
| 3   | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 17~27    | 涂 Ni 注 Al |

#### 六、成型工艺简单灵活及材料、结构的可设计性

复合材料可用模具采用一次成型来制造各种构件，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各种不同方向铺设的设计，使增强材料可有效发挥作用，把潜在的性能集中到必要的方向。通过调整复合材料各组份的成分、结构及分配方式，既能使构件在不同方向承受不同作用力，而且还可制得兼有刚性和韧性，弹性和塑性等矛盾性能的复合材料及多功能制品。

上面所提出的有关复合材料的一些主要特性，概括起来有两个方面。一方面强调了复合效果，说明了复合材料在性能和成型上具有它的组份所没有的各种长处；另一方面突出了复合材料的可设计性，这有利于最大地发挥材料作用，减少材料用量，满足特殊性能要求，因而复合材料在今后的发展上前途无限。

因为复合材料具有上述特性，所以近代复合材料发展历史虽然不长，但已成为一种引人注目的新型材料，在国民经济及尖端科学技术上有广阔的应用前景。在航天、航空方面应用最早，如果说，没有近代复合材料也就不可能有当今的宇航工业，这也不算过份。美国的“阿特拉斯”导弹发动机使用了增强复合材料，重量比金属减轻了45%，射程由原来的1600 km增加到4000 km。为了满足再入大气层时的防热要求，国内外在远程导弹的防热方案及具体制造中，基本上都是采用玻璃纤维增强酚醛树脂或碳/碳复合材料。

在航空工业上用新型复合材料制造机翼、机身、大梁、风扇叶片的研究工作均已取得一定的成效。据报导，美国几家大的飞机制造公司如波音公司等都已争先设计采用高性能复合材料，波音747飞机内外使用的复合材料总面积比波音707增加了近五倍，而机外结构由 $18\text{ m}^2$ 增加到 $900\text{ m}^2$ ，增

加了近五十倍，今后计划是大量采用碳纤维及有机纤维芳纶增强树脂复合材料。至于船舰和车辆制造方面，前途更为乐观，美国 1946 年制造了第一艘玻璃钢交通艇，现在美国海军规定，长 16 m 以下的船舰全部采用增强复合材料制作。我国自 1958 年以来也研制了各种玻璃钢船。最大的玻璃钢船为  $39\text{ m} \times 6\text{ m}$ 。增强复合材料用于汽车工业可以降低油耗量，延长使用寿命。使用纤维增强复合材料制造汽车各种部件，已成为当前节能的重要措施。至于在建筑方面，从建筑物主要承力结构到非承力结构，如屋顶、顶棚、隔墙、地板、门窗等几乎全是复合材料。当然，这都是一些一般性的复合材料，但随着复合材料生产工业不断发展，近代复合材料将从军用产品向民用产品过渡。反过来，由于民用产品大规模地采用而将进一步促使近代复合材料发展。人们大规模采用价廉物美的复合材料的日子是不会很远的了。复合材料具体的应用详见第八章。

复合材料也还存在不足之处，是我们在使用与设计时必须重视的问题。可参看第二章。

## 第二章 复合材料的基础理论及 简单的设计知识

复合材料正在飞速发展，其原因在于它们的优异性能。与其它通用材料相比，其主要特点在于其性能的复合效果与其性能的可设计性。从此观点出发，要了解复合材料及合理使用复合材料，应该对以下几个方面问题有些基本了解。

1. 复合的原材料：包括基体与增强材料的种类与性能；
2. 复合过程即复合材料（或构件）的成型工艺：包括原料混合、基体浸渍、挤出、层压、缠绕、发泡等工艺过程及过程中基体材料的固化条件等；
3. 复合状态：增强材料的形状、尺寸、分布状况（方向性或取向）、连续或不连续以及基体与增强材料之间的界面结合状态；
4. 复合效果：复合材料的各种性能的具体表现。

上述四方面的情况，大部分将在以后各章中给以叙述。本章主要讨论复合材料的一些基本理论，如原材料界面效应及其影响因素以及设计复合材料制件的基本知识。

### § 2-1 复合材料的界面效应

复合材料具有多相体系的独特结构，决定了它的结构内部必然存在着相与相之间的界面状态。在含纤维 60% 的玻璃钢内，当纤维直径为  $10\mu\text{m}$  时，统计结果， $100\text{cm}^3$  的增强复合材料内的界面面积可高达  $4 \times 10^8\text{cm}^2$ ；若改为直径为