

# 高性能复合材料最新技术

〔日〕植村益次 牧 广 主编

贾丽霞 白淳岳 译

朱 培 校

中国建筑工业出版社

# 高性能复合材料最新技术

〔日〕植村益次 牧 广 主编

贾丽霞 白淳岳 译

朱 培 校

中国建筑工业出版社

# 目 录

## 第一章 总 论

1. 序——复合的思想和复合材料的种类..... 1
2. 纤维增强复合材料的生产现状..... 3
  - 2.1 纤维增强塑料的销售趋势..... 3
  - 2.2 纤维增强热塑性塑料的销售量..... 5
3. 目前纤维增强复合材料存在的问题和对高性能复合材料的期望..... 6
  - 3.1 大量应用玻璃纤维增强塑料的理由..... 6
  - 3.2 对高性能复合材料的期望..... 8
    - 3.2.1 对通过更高性能的纤维获得高比强度、高比刚度复合材料的要求..... 8
    - 3.2.2 对提高高温特性、耐热性的要求..... 11
    - 3.2.3 对改进成型方法和成型技术的要求..... 12
    - 3.2.4 对开发复合材料新用途的要求..... 13
4. 高性能复合材料的开发现状..... 13
5. 由混杂化带来的高性能化..... 14
6. 开发高性能复合材料时存在的问题..... 18
  - 6.1 开发更高强的增强纤维的意义..... 18
  - 6.2 方向性、各向异性的利用及最佳设计的必要性..... 23
  - 6.3 复合材料并不是金属的替代材料..... 23
  - 6.4 复合材料特性的离散性和提高可靠性的必要性..... 24
  - 6.5 非破坏检验方法等检验基准..... 24

## 第二章 增强纤维的新技术和用途开发

1. 碳纤维..... 26
  - 1.1 碳纤维的制造方法和物理性能..... 26
    - 1.1.1 聚丙烯腈系碳纤维的制造方法和物理性能..... 26

1.1.2 沥青系碳纤维的 制造方法.....28	2.3.2 开芙拉-29.....108
1.1.3 碳纤维的物理 性能.....31	2.3.3 开芙拉 .....123
1.2 碳纤维复合材料的成 型方法.....47	3.碳化硅纤维 .....127
1.2.1 碳纤维增强塑料 的成型方法.....47	3.1 研制概况和开发的 意义 .....127
1.2.2 碳纤维增强金属 的制造方法.....52	3.1.1 研制概况 .....127
1.3 碳纤维复合材料的 特性.....54	3.1.2 开发的意义 .....127
1.3.1 碳纤维增强塑料 的特性.....54	3.2 制造方法和物理 性能 .....128
1.3.2 碳纤维增强热塑 性塑料的各种特性.....71	3.2.1 制造方法 .....128
1.3.3 碳纤维增强金属 的特性.....74	3.2.2 特征及典型 特性 .....129
1.3.4 混杂复合材料.....81	3.3 碳化硅纤维尼可纶 的用途 .....132
1.4 各产业部门中的应 用和设计技术.....84	3.3.1 概要 .....132
1.4.1 各产业部门中 的应用.....84	3.3.2 与金属复合 .....132
1.4.2 设计技术.....86	3.3.3 与树脂复合 .....138
1.4.3 碳纤维增强塑料 的未来.....89	3.3.4 无机系复合材料.....140
2.芳纶纤维——开芙拉.....95	3.3.5 其它 .....140
2.1 开芙拉纤维.....95	4.氧化铝纤维 .....142
2.2 开芙拉纤维特性.....96	4.1 氧化铝纤维的制法 和物理性能 .....142
2.3 开芙拉纤维增强复合 材料的特性、制造方法及 应用实例.....99	4.1.1 氧化铝纤维的 制法 .....142
2.3.1 开芙拉-49 .....99	4.1.2 氧化铝纤维的物 理性能 .....143
	4.2 氧化铝纤维复合 材料 .....144
	4.2.1 氧化铝纤维增强 塑料 .....144
	4.2.2 氧化铝纤维增强 金属 .....145
	4.3 氧化铝纤维的用途 .....149

4.3.1 氧化铝纤维增强塑料 .....	150	5.2.5 在制动器、离合器 器等摩擦材料方面的 应用(D-型) .....	162
4.3.2 氧化铝纤维增强 金属 .....	150	5.2.6 在纤维增强热塑性 塑料方面的应用(主要 是D-型) .....	162
4.4 小结 .....	150	5.3. 云母 .....	166
5. 其它增强材料 .....	151	5.3.1 塑料增强用云母 及其物性 .....	166
5.1 其它纤维、晶须 和填料 .....	151	5.3.2 云母增强塑料的 成型方法 .....	169
5.2 钛酸钾纤维(晶须) .....	158	5.3.3 云母增强塑料的 特性 .....	175
5.2.1 钛酸钾纤维的结 构和性能 .....	158	5.3.4 在各产业部门中的 应用和设计技术 .....	176
5.2.2 钛酸钾纤维的制 造方法 .....	159		
5.2.3 钛酸钾纤维的开 发经过 .....	161		
5.2.4 在过滤器、隔膜方 面的应用(L-型) .....	161		

### 第三章 高性能复合材料的成型方法和成型技术

1. 纤维增强塑料 .....	184	1.4 各种成型方法分述 .....	219
1.1 概要 .....	184	1.4.1 手糊成型 .....	219
1.2 高性能纤维增强塑料 成型中存在的基本问题 .....	185	1.4.2 冷模压成型 .....	224
1.2.1 影响纤维增强塑 料性能的因素 .....	185	1.4.3 温压成型 .....	232
1.2.2 混杂纤维增强 塑料 .....	196	1.4.4 片状模塑料 .....	234
1.3 玻璃纤维增强塑料成 型方法概述 .....	199	1.4.5 块状模塑料 .....	252
1.3.1 玻璃纤维增强 材料 .....	199	1.4.6 连续挤拉成型 .....	258
1.3.2 成型方法 .....	200	1.4.7 纤维缠绕成型 .....	268
1.3.3 成型制品的特性 .....	204	1.4.8 纤维增强热塑性 塑料板的冲压成型 .....	271
		1.4.9 纤维增强热塑性 塑料的注射成型 .....	278
		1.4.10 增强反应注射 模塑 .....	279

2. 纤维增强金属 .....	298
2.1 概要 .....	298
2.2 增强金属用的纤维 .....	299
2.3 复合材料的制造方法 和加工方法 .....	300
2.3.1 预浸带的制作 .....	302
2.3.2 预浸丝、预浸纱 .....	304
2.3.3 固体扩散粘接法 .....	306
2.3.4 液体铸造法 .....	311
2.3.5 单向凝固法 .....	312
2.3.6 复合材料的二次 成型方法 .....	315
2.4 小结 .....	318
3. 玻璃纤维增强水泥 .....	319
3.1 概要 .....	319
3.2 耐碱玻璃纤维 .....	320

3.3 玻璃纤维增强水泥制 品的成型方法 .....	320
3.3.1 原料和配比 .....	320
3.3.2 成型方法和玻璃 纤维增强水泥的特性 .....	321
3.3.3 成型方法概述 .....	321
3.4 小结 .....	328
4. 纤维增强橡胶 .....	329
4.1 纤维增强橡胶基材的 功能 .....	329
4.1.1 基材的功能 .....	329
4.1.2 纤维增强橡胶的 结构 .....	330
4.2 制造方法 .....	335
4.2.1 制造过程 .....	335
4.2.2 轮胎的制造过程 .....	338

## 第四章 各产业部门中的技术问题与展望

1. 汽车工业 .....	343
1.1 概要 .....	343
1.2 美国1981型轿车上 使用的复合材料 .....	345
1.2.1 车身板和表面 构件 .....	346
1.2.2 发动机罩下部 零件 .....	347
1.2.3 乘客室部件 .....	347
1.2.4 电气零件 .....	348
1.2.5 发动机传动零件 .....	349
1.2.6 悬架、底盘和框架 的用途 .....	349
1.3 美国1981型货车上使	

用的复合材料 .....	350
1.3.1 驾驶室篷和表面 部件 .....	351
1.3.2 驾驶室室内零件 .....	352
1.3.3 发动机罩下部 零件 .....	353
1.3.4 车篷前端 .....	353
1.3.5 表面附件 .....	354
1.4 今后的趋势及课题 .....	354
2. 宇航工业 .....	355
2.1 概要 .....	355
2.2 对轻量化的要求 .....	357
2.3 先进复合材料的 现状 .....	363

2.4 石墨/聚酰亚胺复合 材料的兴起 .....	368	4.2.1 滑雪板 .....	412
2.5 作为烧蚀材料的 应用 .....	376	4.2.2 网球拍 .....	417
2.5.1 烧蚀法 .....	376	4.2.3 垒球棒 .....	418
2.5.2 重返大气层时的热 环境和烧蚀 .....	377	5.能源 .....	423
2.5.3 固体火箭喷嘴的热 环境和烧蚀 .....	379	5.1 概要 .....	423
2.6 碳纤维潜在的危险 .....	380	5.2 风力发电 .....	424
3.建筑材料 .....	386	5.3 海洋温差发电 .....	427
3.1 概要 .....	386	5.4 波力发电 .....	428
3.2 耐碱玻璃纤维 .....	386	5.5 地热发电 .....	429
3.3 玻璃纤维增强水泥的 原料 .....	387	5.6 太阳能发电 .....	430
3.4 玻璃纤维增强水泥的 物性 .....	389	5.7 煤的液化与气化 .....	431
3.5 施工实例 .....	393	5.8 贮能飞轮 .....	431
3.6 小结 .....	402	5.9 超导器械 .....	434
4.体育用品 .....	403	5.10 小结 .....	434
4.1 高尔夫球棍 .....	404	6.医疗卫生 .....	436
4.1.1 关于高尔夫球棍 .....	404	6.1 医疗界的规模 .....	436
4.1.2 高尔夫球棍的性 能要求 .....	404	6.2 纤维增强塑料与医疗 器械 .....	438
4.1.3 高尔夫球棍的 设计 .....	407	6.3 处置制品与纤维增强 塑料 .....	439
4.1.4 高尔夫球棍的制造 方法 .....	411	6.4 纤维增强塑料义齿 基托 .....	441
4.2 其它体育用品 .....	412	6.5 假肢 .....	444
		6.6 纤维增强塑料与医院 设备器械 .....	447
		6.6.1 医院设备 .....	447
		6.6.2 轮椅的纤维增强塑 料化 .....	449

# 第一章 总 论

## 1.序——复合的思想和复合材料的种类

所谓复合材料，是指把两种以上宏观上不同的材料，合理地进行复合而制得的一种材料，目的是通过复合来提高单一材料所不能发挥的各种特性。以作为一般工业材料使用的金属为例，多数都是合金，所以，从微观上讲，不是复合材料的东西是很少的。但在这里所说的复合材料，是指按上述意图进行复合的材料。

“复合材料”这一名词在民间使用，尤其是它成为引起人们注目的材料，则是在战后。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，即所谓的玻璃纤维增强塑料，被美国空军用于制造飞机的构件，并在1950~1951年传入日本。但复合的思想并不是在这个时期才开始的。例如我们身边常见的以砂、砾石作为廉价骨料，以水和水泥固结的混凝土，则是土木、建筑领域不可缺少的材料，它大约在一百年以前就开始使用了。混凝土具有一定的抗压强度，但比较脆，若受拉伸，容易产生裂纹而破坏。因此，在混凝土中加入钢筋，使其耐拉伸力，从而提高了抗拉、拉弯能力，这就是钢筋混凝土。轮胎也是在保持橡胶的柔软性、气密性的同时，用合成纤维、钢丝等复合，以分担强度。

近年来，人们所见到的复合材料，其典型实例是纤维增强复合材料。其目的虽然在于轻质高强，但是作为复合材料的目的并不仅仅限于强度方面，而是按照对制品所提出的要求，使热性能、电性能、力学性能等所有的性能达到最佳化，与此同时，也要考



虑到成本，并且还可以从成型自由性这一优点中选择。例如，用含有中空气泡的微粒球和基体复合，可以制成比重在1以下的海洋飘浮物。对工业材料往往也评价力学性能以外的特性。综合判断的结果，如本书第四章所述的那样，在各个产业部门中，复合材料的使用是多种多样的，而且作为功能材料的用途也很广泛。

因此，复合材料的长处在于保持各个原材料特色的同时，发挥在单一材料中所见不到的综合的复合特性。因此，复合材料的种类，组合范围很广，本书所介绍的主要是以纤维作为增强材料，与各种基体构成的复合材料。纤维和基体经组合可得到各种复合材料，如表1.1所示。

由各种组合而得到的复合材料

表 1.1

增 强 纤 维	基 体
金属纤维：钢、硼、晶须等  有机纤维：人造纤维、尼龙、开芙拉等  无机纤维：玻璃、碳、碳化硅等	← 纤维增强水泥 ———— 水泥
	← 纤维增强金属 ———— 金属
	← 纤维增强塑料 (纤维增强热塑性塑料) ———— 树脂
	← 纤维增强橡胶 ———— 橡胶

在一般的纤维增强复合材料中，作为强度材料，最实用的是以热固性树脂为基体的纤维增强塑料（FRP）。作为功能材料部件等而使用热塑性树脂时，称为纤维增强热塑性塑料（FRTP）。以金属为基体的纤维增强金属（FRM），与原有的合金相比，在强度、重量、经济方面，优越性不大，还不太实用，但人们寄希望于它的耐高温特性，目前，对它的研究工作很活跃。为补偿水泥的脆性、拉伸强度低等缺点而与短切纤维复合的纤维增强水泥（FRC），正在作为建筑材料使用。众所周知的纤维增强橡胶（FRR）则主要是大量用于轮胎上。

## 2. 纤维增强复合材料的生产现状

### 2.1 纤维增强塑料的销售趋势

除混凝土、轮胎以外，第二次世界大战以后，玻璃纤维增强塑料（GFRP）作为一种典型的复合材料而异军突起，现在已经是工业材料的一员了。图1-1是日美两国战后的玻璃纤维增强塑料和塑料生产量增长情况的比较。1979年，玻璃纤维增强塑料的生产量，美国占世界第一位，达到93.1万吨；日本占第二位，达到24.6万吨。在热固性玻璃纤维增强塑料所用的树脂中，以不饱和聚酯用量最大。当要求高强度时，则使用环氧类树脂；要求耐热性时，以最近开发的聚酰亚胺类树脂等较为理想。目前，大部分玻璃纤维增强塑料都是玻璃纤维/不饱和聚酯系统，可以说已经打下了坚实的产业基础。由图1-1可知，1962~1970年玻璃纤维增强塑料的增长率是显著的，这期间日本的年增长率为41%。但是由于石油危机带来的石油价格上涨，使树脂价格提高，从而影响了玻璃纤维增强塑料与传统材料的竞争能力，增长速度有所减缓。不过，现在还维持20万吨以上的生产量，并有渐增的趋势。表1-2列出了1980年日本年产的21.7万吨玻璃纤维增强塑料按用途分类的生产量。玻璃纤维增强塑料在日本的最大用途是与住宅有关的器材，但最近由于住宅情况不佳，这也是玻璃纤维增强塑料增长缓慢的原因之一。

因此，在本书中，对已成为主流的玻璃纤维增强塑料，除了涉及新成型方法、新制品开发等范畴以外，其余就不再论及了。有关一般的复合材料及纤维增强塑料的详细介绍，请参阅便览等文献<sup>(1)~(4)</sup>。

除本书所介绍的玻璃纤维增强塑料外，高性能纤维增强塑料，其量较少，要达到玻璃纤维增强塑料的统计规模，尚需假以时日。然而，以碳纤维为例，大约十年前才开始制造销售，但目前

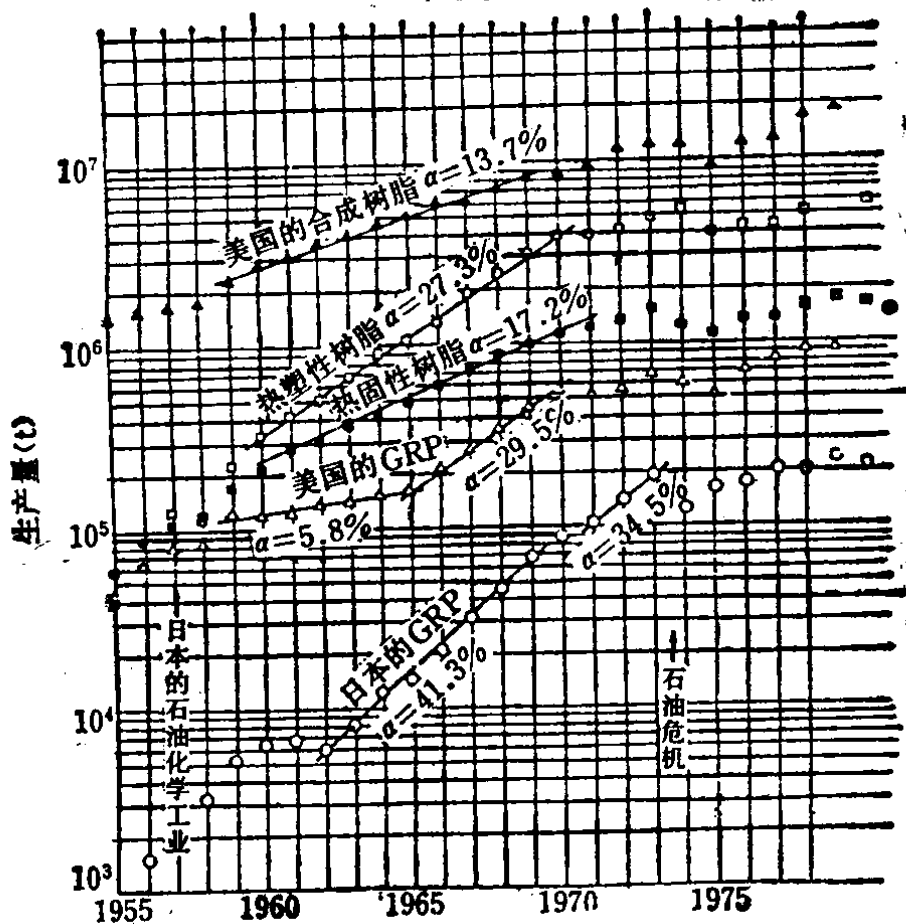


图 1.1 玻璃纤维增强塑料 (GRP) 及塑料生产量的增长情况

日本玻璃纤维增强塑料按不同用途的产量分布(1980年) 表 1.2

用途分类	主要制品	产量(t)
1. 建筑器材	玻形瓦, 平板, 一般建筑的内外装饰制品, 土木建筑工程制品	20830
2. 住宅器材	浴室及其它卫生设备	73190
3. 船舶	舟艇, 船舶及舢装件	44900
4. 汽车、车辆	汽车, 车辆及其零部件	3830
5. 贮罐、容器	耐腐蚀贮罐、容器及一般贮罐, 容器类	24570
6. 工业器材	管道, 工业机器的本体、零件以及电器制品	20870
7. 杂品	安全帽, 服装模特, 娱乐用品等	9270
8. 其它	上述分类以外的制品	20290
合计		217750

据说月产量达到一百吨，其增长率确实惊人。

## 2.2 纤维增强热塑性塑料的销售量

1978年，日本通产省公布了用做纤维增强热塑性塑料基体的高功能树脂之供需实际调查情况<sup>(5)</sup>，如表1.3所示。这在世界上还是首次。表中，使用部门的调查，限于汽车及其它的运输机械、电气设备、电子设备、一般机械、精密机械等，因为回答率高功能树脂在使用部门的用量和生产厂的产量调查

(1978年通产省调查)

表 1.3

树 脂		使用部门用量	生产厂产量 (t)
聚酰胺	尼龙-6	1598	3874
	尼龙-66	555	1538
	其它尼龙	370	60
	小 计	2523	5470
聚 甲 醛	1366	1476	
聚碳酸酯	1581	3342	
聚对苯二甲酸乙二醇酯	640	—	
聚对苯二甲酸丁二醇酯	1553	6447	
氟 树 脂	20	320	
硅 树 脂	8	550	
聚 丙 烯	16854	27142	
丙烯腈-苯乙烯共聚物	1688	5732	
丙烯腈-丁二烯-苯乙烯三元共聚物	2318	1618	
聚 苯 醚	505	—	
聚苯硫醚	46	—	
聚烯丙酯		—	
聚 砜	5	—	
聚酰亚胺	2	—	
聚酰胺酰亚胺		—	
全芳香族聚酯	2	—	
三嗪树脂(含改性)	0.1	—	
感光树脂		—	
导电树脂		—	
其它树脂	41	—	
总 计	29154	52095	

是46.2%，所以使用量比生产厂的调查少。在使用部门中调查的2.92万吨树脂用量中，用玻璃纤维增强的为1.24万吨，用混杂纤维增强的为0.176万吨，其余可能为一般填料增强，但玻璃纤维增强热塑性塑料的产量也确实在增长。

由于耐碱玻璃纤维的开发，玻璃纤维增强水泥正引起人们的注意，但在数量方面还没有把握。纤维增强金属开发得最晚，还不到谈论数量的阶段。

### 3. 目前纤维增强复合材料存在的问题和对高性能复合材料的期望

#### 3.1 大量应用玻璃纤维增强塑料的理由

如前所述，对于纤维增强复合材料来说，虽然已经制造出各种组合的复合材料，并已投入市场，但实际的生产量大部分是玻璃纤维增强不饱和聚酯塑料（GFRP）。关于一般的纤维增强塑料，其优点后文将要提到。大量使用玻璃纤维增强塑料的理由可以归纳为：

（1）玻璃纤维价格比较便宜，可以大量生产，且是无机纤维，具有不燃性，拉伸强度并不比高性能的先进纤维差。

（2）与树脂结合的纤维表面处理技术经过多年的工作，大致达到了完成的阶段。

（3）树脂绝大部分是不饱和聚酯，它无须加热，通过引发剂、促进剂便可常温固化，而且固化时无副产物，所以不需要加压，这或许就是成型加工简单和价格较低廉的原因吧。

因此，在目前，玻璃纤维增强塑料占主流。一般纤维增强塑料的优点可以简单归纳为如下几点：

（1）以前，开发的动机是谋求轻质高强的材料，而现在，利用它轻质高强以外的特性来作功能材料的用途也很多。

（2）可以用整体成型方法由原材料直接制造出任意形状的

制品，几乎无须进行机械加工，从而减少了工序，降低了成本。

(3) 与金属、木材相比，它不生锈、不腐蚀，且耐化学药品，能长期使用，不需涂漆等维护费用。

(4) 是热的不良导体，隔热、保温性能优异。

(5) 玻璃纤维增强塑料是电的不良导体，但能透过电波（这要取决于纤维的种类）。

(6) 在纤维方向的热膨胀系数小，即使受到温度变化，尺寸稳定性也好。

(7) 面临能源危机，从节省能源的观点出发，必须综合考虑制造材料与构件时所耗费的能量和使用复合材料构件时的能量。使用复合材料而带来的结构轻量化，除了性能提高外，还有减少运行费用的意义。例如，复合材料在汽车上的应用受到大家的关心。作为一个例子，汽车的防护罩，以现在的钢板制的条件为基准，代之以铝合金、整体成型的纤维增强塑料，它们的能量消耗分别列于表1.4中。由于防护罩采用了纤维增强塑料，不仅节约了使用期间所消耗的汽油燃料费，而且从国家角度来看，节省的能量是很大的。

发动机防护罩能量消耗比较

(以钢板制品为基准)

表 1.4

材 料	钢	铝 合 金	玻璃纤维增强塑料
重 量 (kg)	34	17	15
制造时需要的能量 (kcal)	$5.3 \times 10^5$	$10 \times 10^5$	$3.4 \times 10^5$
制造时节省的能量 (kcal)		$-4.7 \times 10^5$	$1.9 \times 10^5$
由减重所带来的省能 (kcal)		$11 \times 10^5$	$11.8 \times 10^5$
总 省 能 (kcal)		$6.3 \times 10^5$	$13.7 \times 10^5$

以上列举了纤维增强复合材料的优点。除此以外，根据增强纤维的种类不同，具有各自特点，适合各种用途。关于这些将在第二章高性能纤维的各节中介绍。

但是，在实际应用新材料时，不能只考虑优点方面，还需充

分了解它的缺点，并且也要考虑成本，综合地加以判断。从另一角度来说，这些缺点又成为开发高性能复合材料的很大推动力，为今后的发展提出了方向。这些缺点是：

(1) 纤维增强塑料耐热性差，不适合在高温下长期使用，耐燃性差，必须要有自熄性。若能解决有毒气体的发生问题，则对于建筑材料、车辆结构材料的限制也会缓和，就有可能进一步扩大用途。对纤维增强金属，虽有所期待，但成本是个问题，而且用现有的制造方法是否能制造大尺寸构件也仍然是一道关口。

(2) 尽管具有耐腐蚀性，但根据使用环境，对其耐候性来说，在长期使用期间有性能老化现象。

(3) 随着机械成型的普及，提高了制品生产的重复性，但对于由各种基材制成的复合材料，其影响因素极多。为此，特性值的离散性大，缺乏作为材料的可靠性。因为非破坏检验方法还未建立，所以不得不取大的安全系数。

(4) 石油危机以来，石油价格的高涨，减弱了与金属材料的竞争力。

(5) 由于开发历史不长，各种基材的种类多，影响因素也多，所以，对各种组成的新复合材料，缺乏物性资料。

以上虽是部分缺点，但是归纳起来，开拓新用途时，因地制宜地选择材料是重要的，而且，在计算成本时，若考虑复合材料的特点，即：不仅是把初期价格作为比较基准，还要从包括维修费、运行费以及耐用年限在内的总成本性能的观点来考虑，那么，复合材料从选择开始就可得到较高的评价。

### 3.2 对高性能复合材料的期望

如前节所述，玻璃纤维增强塑料或者玻璃纤维增强热塑性塑料现在已被大量使用，出版《高性能复合材料的最新技术》这本书，是因为即使在玻璃纤维增强塑料中也还存在很多问题，也是由于以下理由所致。

#### 3.2.1 对通过更高性能的纤维获得高比强度、高比刚度复合材料的要求

纤维增强塑料的比强度、比刚度虽然很大，但需注意，这仅限于单向增强材料的纤维方向的特性。实际上，复合材料的各种结构，是用单向增强材料以外的各种增强纤维基材做成的，如果观察其破坏状况，未必是由纤维方向的拉伸破坏来决定耐久极限。因为纤维增强材料是各向异性的，所以与纤维垂直方向的拉伸强度及沿纤维方向的剪切强度极低，当然比金属等各向同性材料低得多。然而，当只受到单向应力时，就可以充分地发挥单向增强材料的纤维方向强度的优越性。纤维方向的弹性系数（即刚性），根据复合法则，与纤维刚性成比例；与纤维垂直方向的刚性和剪切刚性，即使不随着纤维刚性的增大而成比例地增大，但也有助于特性值的提高。

对于单向增强复合材料，都希望强度和刚性大，但在结构件上采用这类复合材料时，应以下述的材料指标做为选择的基准。表1.5指出了各种结构件受到各种荷载以及用各种适用的极限条件来决定设计时的结构材料指标。所谓材料指标，指的是给出传递长度和荷载时，决定其结构件重量的指标，若材料指标大，就意味着可以轻量化。荷载极限随采取的强度基准或变形量、屈曲值基准的不同而异，也随结构形态和荷载的种类而异。由表1.5可知，由弯曲、屈曲决定设计时，其指标为 $\sqrt{E}/\rho$ 或 $\sqrt[3]{E}/\rho$ ，而轴向增强材料用在仅由轴向特性支配的结构件上时，轻质纤维增强塑料材料是用 $E-\rho$ 指标进行比较，这比弯曲和屈曲更为有利。

在这种意义上，也可以说希望开发比玻璃纤维轻，强度和纵弹性模量高的纤维。

与玻璃纤维相比较，最近开发的典型的高性能增强纤维如表1.6所示。

如表1.7中各种高比强度材料的比较所示，以玻璃纤维为增强材料的增强塑料，它的最大弱点是刚度差，即使取比刚度( $EL/\rho$ )也不如通常的金属材料。也就是说，纤维本身的弹性模量（纵弹性模量），常用的 $E$ 玻璃为 $E_f = 7300 \text{ kgf/mm}^2$ ，以塑料为基体的玻璃纤维增强塑料，设纤维的体积含量为 $V_f$ ，根据复合法则，



结构件的材料指标

表 1.5

构 件	荷 载	极限条件	指 标	备 注
棒	拉伸	破坏	$\sigma_B/\rho$	强度指标
棒	拉伸	延伸	$E/\rho$	变形指标
棒	弯曲	破坏	$\sqrt{\sigma_B/\rho}$	强度指标
棒	弯曲	挠曲	$\sqrt[3]{E/\rho}$	变形指标
棒	压缩	屈曲	$\sqrt{E/\rho}$	屈曲指标
平板	压缩	屈曲	$\sqrt[3]{E/\rho}$	屈曲指标
圆筒	压缩	屈曲	$\sqrt{E/\rho}$	屈曲指标
圆筒	弯曲	屈曲	$\sqrt{E\rho}$	屈曲指标

典型的增强用纤维的代表值

表 1.6

纤维种类	材料名称	比 重 g/cm <sup>3</sup>	拉伸强度 kgf/mm <sup>2</sup>	纵弹性模量 kgf/mm <sup>2</sup>
玻 璃	E 玻璃	2.55	200~280	7350
碳	东丽 T300A	1.78	250	23000
硼	Borofil	2.63	175~280	40000
芳 纶	开美拉	1.45	280	13000
碳化硅	日本碳尼可纶	2.5	250	18000

各种高比强度材料的强度和刚度的比较

表 1.7

材 料 种 类	比重 $\rho$ g/cm <sup>3</sup>	拉伸 强度 $\sigma_B$ kgf/ mm <sup>2</sup>	纵弹性 模 量 $E$ kgf/ mm <sup>2</sup>	强度指标		刚度指标		
				$\sigma_B/\rho$	$\sqrt{\sigma_B/\rho}$	$E/\rho$	$\sqrt{E/\rho}$	$\sqrt[3]{E/\rho}$
高强度钢	7.8	140	21000	17.9	1.5	2690	18.6	3.5
硬 铝	2.7	51	7300	18.9	2.6	2700	31.6	7.2
钛 合 金(6Al-4V)	4.4	100	11200	22.7	2.3	2550	24.1	5.1
玻璃纤维	2.0	140	4200	70	5.9	2100	32.4	8.1
增强塑料	2.0	70	2100	35	4.2	1050	22.9	6.4
碳纤维增 强塑料	1.6	160	14000	100	7.9	8750	74.0	15.1
开美拉	1.3	130	7000	100	8.8	5380	64.4	14.7