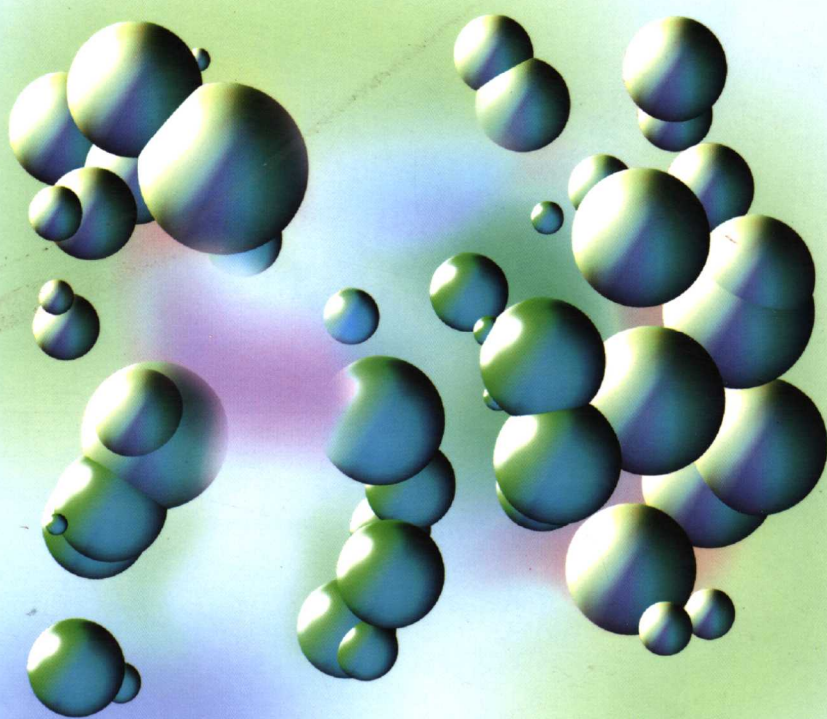


· 高等学校专业教材 ·

聚合物复合材料

高分子材料与工程专业系列教材

黄丽 主编 黄丽 陈晓红 宋怀河 合编



 中国轻工业出版社

高等学校专业教材

聚合物复合材料

高分子材料与工程专业系列教材

黄 丽 主编

黄 丽 陈晓红 宋怀河 合编

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

聚合物复合材料/黄丽主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2001.6

高等学校专业教材

ISBN 7-5019-2629-8

I. 聚… II. 黄… III. 高聚物-复合材料-高等学校-教材 IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 15045 号

责任编辑: 王 淳

策划编辑: 王 淳 责任终审: 劳国强 封面设计: 崔 云

版式设计: 智苏亚 责任校对: 燕 杰 责任监印: 胡 兵

*

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

联系电话: 010-65241695 6528.6486

印 刷: 中国人民警官大学印刷厂

经 销: 各地新华书店

版 次: 2001 年 6 月第 1 版 2001 年 6 月第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.5

字 数: 416 千字 印数: 1—3000

书 号: ISBN 7-5019-2629-8/TQ·191

定 价: 35.00 元

· 如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换 ·

前 言

本书为高分子材料与工程本科专业教材之一。作为 20 世纪人类创造的奇迹之一，聚合物复合材料将在 21 世纪展现出奇特的化学，物理特性，开辟出一片崭新的科技天地。人类在科学技术上的进步往往是与新材料的出现和应用分不开的，多种材料的复合改善了某些单一材料不能满足使用的要求，人们用两种或两种以上的材料复合制成一种材料，从而克服了单一一种材料在使用上的性能弱点，使这种复合材料表现出一种新的性能，达到综合利用的目的。

根据教育部拓宽专业、加强素质教育的办学指导思想，我们将原有的与聚合物有关的窄专业，如“高分子材料”、“高分子化工”、“塑料成型加工”、“橡胶工程”、“复合材料”等专业统一起来，成为一个全面覆盖高分子科学技术的“大高分子”宽专业。

通过对有机高分子物质的合成、结构与性能的关系、加工应用与工程设计的内容归纳，我们制订了这一宽专业的教学框架，并组织编写了一套系列教材：《材料导论》、《聚合物材料》、《聚合物改性》、《聚合物复合材料》、《聚合物加工工程》、《聚合物制备工程》、《聚合物研究方法》。

《聚合物复合材料》一书黄丽撰写了第 1 章、第 2 章、第 6 章、第 7 章；陈晓红撰写了第 3 章、第 5 章；宋怀河撰写了第 4 章；王培华教授进行了审阅。在此书的编写过程中得到了赵素合、吴刚、励杭泉、王国全、王秀芬、凌绳、张丽叶、毛立新等老师的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！由于编写此书时间仓促，书中有不尽完善之处，恳请广大读者批评，以期重印时得到纠正。

编 者

2001 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 复合材料的发展史	(1)
1.2 复合材料的定义、命名及分类	(3)
1.2.1 复合材料的定义	(3)
1.2.2 复合材料的命名	(3)
1.2.3 复合材料的分类	(4)
1.3 复合材料的特性	(6)
1.3.1 比强度和比模量	(6)
1.3.2 抗疲劳性能	(6)
1.3.3 减振性能	(7)
1.3.4 过载安全性	(7)
1.3.5 高温性能	(7)
1.3.6 具有可设计性	(7)
1.4 对高性能复合材料的期望及开发现状	(8)
1.4.1 对高性能复合材料的期望	(8)
1.4.2 高性能复合材料的开发现状	(10)
第 2 章 基体材料	(13)
2.1 概述	(13)
2.2 聚合物基体	(14)
2.2.1 热固性树脂基体	(14)
2.2.2 热塑性树脂基体	(47)
2.3 金属基体	(56)
2.4 陶瓷基体	(59)
2.5 碳基体	(61)
2.5.1 液相浸渍碳	(62)
2.5.2 化学气相沉积碳	(67)
2.5.3 烧结碳	(67)
第 3 章 复合材料的增强材料	(69)
3.1 玻璃纤维	(69)
3.1.1 玻璃纤维的分类	(70)
3.1.2 玻璃纤维的制造方法	(70)
3.1.3 玻璃纤维的组成和结构	(71)
3.1.4 玻璃纤维的性能	(72)

3.1.5	玻璃纤维制品及其应用	(74)
3.1.6	特种玻璃纤维	(75)
3.2	碳纤维	(77)
3.2.1	碳纤维的分类及其制品	(77)
3.2.2	碳纤维的制造	(77)
3.2.3	沥青基碳纤维	(80)
3.2.4	碳纤维的结构与性能	(81)
3.3	有机高分子纤维	(82)
3.3.1	芳香族聚酰胺纤维	(83)
3.3.2	芳香族聚酯纤维	(88)
3.3.3	超高相对分子质量聚乙烯纤维	(90)
3.4	陶瓷纤维	(92)
3.4.1	碳化硅纤维	(92)
3.4.2	氧化铝纤维	(95)
3.4.3	含硼纤维	(97)
3.5	金属纤维	(99)
3.6	晶须	(101)
3.6.1	碳化硅晶须	(101)
3.6.2	碳酸钙晶须	(102)
3.6.3	钛酸钾晶须	(102)
3.6.4	磷酸钙晶须	(105)
3.6.5	氧化锌晶须	(105)
3.7	粉体增强材料	(106)
3.7.1	碳酸钙	(110)
3.7.2	氮化硅	(111)
3.7.3	碳化硅	(112)
3.7.4	碳化硼	(112)
3.7.5	氧化锆	(113)
3.7.6	氧化铝	(114)
3.7.7	莫来石粉料	(115)
3.7.8	炭黑	(115)
3.7.9	白炭黑	(117)
3.7.10	微小球体粉料	(118)
3.7.11	热塑性树脂粉末	(118)
第4章	纤维复合材料及其制造方法	(120)
4.1	聚合物基复合材料	(120)
4.1.1	概述	(120)
4.1.2	聚合物基体	(121)

4.1.3	聚合物基复合材料的制造方法	(132)
4.1.4	聚合物基复合材料的基本性能	(141)
4.2	碳基复合材料	(149)
4.2.1	概述	(149)
4.2.2	碳纤维与基体的选择	(149)
4.2.3	预成型体(坯体)	(152)
4.2.4	制备工艺	(153)
4.2.5	C/C复合材料的性能	(157)
4.2.6	C/C复合材料的应用	(160)
4.3	混杂纤维复合材料	(162)
4.3.1	混杂纤维复合材料的结构形式	(162)
4.3.2	混杂纤维复合材料的特性	(163)
4.3.3	混杂纤维复合材料的应用	(164)
4.4	其它复合材料	(169)
4.4.1	功能复合材料	(169)
4.4.2	生体复合材料	(178)
4.4.3	智能复合材料	(182)
第5章	复合材料力学性能	(184)
5.1	概述	(184)
5.1.1	复合材料力学性能的特点	(184)
5.1.2	复合材料力学分类	(186)
5.2	各向异性弹性材料力学基础	(186)
5.2.1	应力和应变	(186)
5.3	单层板的弹性特性	(200)
5.3.1	单层板的主方向的弹性特性	(200)
5.3.2	单层板非弹性主方向的弹性特性	(202)
5.4	单层板的强度理论	(206)
5.5	复合材料的力学性能试验	(209)
5.5.1	拉伸试验	(209)
5.5.2	压缩试验	(211)
5.5.3	剪切试验	(211)
5.5.4	弯曲试验	(213)
5.6	单向复合材料各组分的强度准则	(214)
5.6.1	聚合物基体的强度	(214)
5.6.2	纤维强度	(216)
5.6.3	粘结强度	(217)
5.7	复合材料单向层板均匀各向同性材料的强度理论	(223)
5.8	纤维复合材料的疲劳行为	(233)

5.8.1	复合材料的疲劳损伤	(233)
5.8.2	复合材料的疲劳性能及其影响因素	(235)
5.8.3	疲劳寿命的预测	(236)
5.9	单向复合材料的破坏模式	(237)
5.9.1	纵向拉伸破坏	(237)
5.9.2	横向拉伸破坏	(238)
5.9.3	纵向压缩破坏	(238)
5.9.4	横向压缩破坏	(238)
5.9.5	面内剪切破坏	(238)
第6章	复合材料的界面	(240)
6.1	研究复合材料界面的重要性	(240)
6.2	高聚物复合材料界面的形成及作用机理	(241)
6.2.1	界面层的形成	(241)
6.2.2	界面层的作用机理	(244)
6.3	填充、增强材料的表面处理	(245)
6.3.1	玻璃纤维的表面处理	(246)
6.3.2	碳纤维的表面处理	(249)
6.3.3	粉状填料的表面处理	(251)
6.4	复合材料界面分析技术	(253)
6.4.1	红外光谱研究	(253)
6.4.2	电子显微镜法	(255)
6.4.3	X射线光电子能谱	(256)
第7章	复合物理化性能	(258)
7.1	功能复合材料的发展和应用	(258)
7.1.1	功能复合材料的发展	(258)
7.1.2	功能复合材料的应用	(259)
7.2	复合材料的理化性能	(261)
7.2.1	复合材料的应用与理化性能研究	(261)
7.2.2	复合物理化性能的决定因素	(261)
7.2.3	复合状态和复合效应	(262)
7.3	复合材料的热物理性能及耐烧蚀性能	(266)
7.3.1	引言	(266)
7.3.2	复合材料的热传导	(266)
7.3.3	复合材料的比热容	(276)
7.3.4	复合材料的热膨胀	(278)
7.3.5	隔热、防热复合材料	(283)
7.3.6	阻燃复合材料	(294)
	参考文献	(303)

第1章 绪 论

1.1 复合材料的发展史

近几十年来,材料科学得到了突飞猛进的发展。材料科学的发展史与现状表明,人类在科学技术上的进步往往是与新材料的出现和应用分不开的。总结材料发展的历史,特别是近几十年来,对于材料的研究由靠经验摸索的办法发展到不仅可以通过分子合成、材料改性及多种材料的复合而得到新材料,而且还可以从分子结构设计来研制预定性能的材料,形成较完整的材料科学体系。

单一材料有时不能满足实际使用的某些要求,人们就把两种或两种以上的材料制成复合材料,以克服单一种材料在使用上的性能弱点,改进原来单一材料的性能,并通过各组分的匹配协同作用,还可以出现原来单一材料所没有的新性能,达到材料综合利用的目的,以提高使用与经济效益。

复合材料是一种多相复合体系。在复合体系中可以是异质异相的,也可以是同质异相的。因此,通过不同质的组成、不同相的结构、不同含量及不同方式的复合,可以制造出满足各种用途的复合材料。

作为一门学科,复合材料的出现及发展不过是近几十年的事情。但是人类是从很早就开始使用复合材料了。比如说,从天然树脂虫胶、沥青作为粘合剂制作层合板,以砂、砾石作为廉价骨料,以水和水泥固结的混凝土材料,它们大约在100年前就开始使用了。混凝土的抗张强度比较好,但比较脆,如处于拉伸状态就容易产生裂纹,而导致脆性断裂。若在混凝土中加入钢筋、钢纤维之后,就可以大大提高混凝土抗拉伸及抗弯曲强度,这就是钢筋混凝土的复合材料。而使用合成树脂制作复合材料,始于20世纪初。人们用苯酚与甲醛反应,制成酚醛树脂,再把酚醛树脂与纸、布、木片等复合在一起制成层压制品,这种层压制品,具有很好的电绝缘性能及强度。20世纪40年代由玻璃纤维增强合成树脂的复合材料—玻璃钢的出现,是现代复合材料发展的重要标志。玻璃纤维复合材料在1946年开始应用于火箭发动机壳体的研究。60年代在各种型号的固体火箭上应用取得成功。如在美国把玻璃纤维复合材料用于制作火箭的发动机壳体以及燃料用的高压容器上;60年代末期则用玻璃纤维复合材料制作了直升机旋翼桨叶等。

在20世纪60~70年代,复合材料不光可用玻璃纤维来增强,还由于一类新型的纤维材料如硼纤维、碳纤维、碳化硅纤维、芳纶(kevlar)纤维的出现,使得复合材料的综合性能得到了很大的提高,并使复合材料的发展进入了新的阶段。这些材料中以碳纤维为例,其复合后的材料的比强度不但超过了玻璃纤维复合材料,而比模量则达其5~8倍以上(见表1-1)。这使结构的承压能力和承受动力负荷能力大为提高。目前碳纤维复合材料不仅已应用于一般的航空结构件,而且已应用于制作主要承力结构件。

表 1-1

各种材料的力学性能

材料名称	相对密度/ (g/cm ³)	拉伸强度/ ×10 ⁴ (kg/cm ²)	弹性模量/ ×10 ⁶ (kg/cm ²)	比强度/ ×10 ⁷ cm	比模量/ ×10 ⁹ cm
钢	7.8	1.03	2.1	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
玻璃纤维复合材料	2.0	1.06	0.4	0.53	0.20
*1碳纤维Ⅱ/环氧树脂	1.45	1.5	1.4	1.03	0.97
*2碳纤维Ⅰ/环氧树脂	1.6	1.07	2.4	0.67	1.5
芳纶纤维/环氧树脂	1.4	1.4	0.8	1.0	0.57
硼纤维/环氧树脂	2.1	1.38	2.1	0.66	1.0
硼纤维/铝	2.65	1.0	2.0	0.38	0.75

*1 碳纤维Ⅱ—为高强型碳纤维；

*2 碳纤维Ⅰ—为高模型碳纤维。

20 世纪 70 年代研究与发展起来的有机纤维,由于重量更轻,在航空航天工业中也开始受到重视。比如说,减轻重量是航天航空技术的关键。要使飞机及各种飞行器飞得更快、更高和更远,就必须减轻飞行器的重量。目前,用金属制成的飞机最高时速大约为 3000km,最高飞行高度约 30km,最大飞行距离约 2 万 km。如果飞机的重量减轻一半,则飞行速度可提高一倍,飞行高度可达 40km 或 50km 以上,飞机绕地球一周而无需加油。可见重量轻、综合性能好的复合材料在航天航空工业中具有其它材料不可取代的重要性。

对于航空及航天飞行器来说,是非常注重飞行器的结构重量的。因此,具有高的比强度、比模量的复合材料,是飞行器理想的结构材料,表 1-1 列出各种材料的力学性能比较。

对于典型的纤维增强复合材料来说,其性能主要要求是质量轻、强度高、力学性能好。但是作为复合材料的使用不仅仅是限于增强力学性能方面,而是将按照对产品所提出的用途要求,通过复合设计使物料在电绝缘性、化学稳定性、热性能等方面与力学性能一样达到综合性的提高。与此同时,也还要考虑到其生产工艺及成本。目前在各个产业部门当中,复合材料的使用是多种多样的,除了在航空航天领域外,在建筑、机械、交通、能源、化工、电子、体育器材及医疗器械等方面的应用也在日益增多,而且作为功能材料的用途也是非常广泛的。随着复合材料及其制品的成型工艺性的不断改进与完善,其成本会逐步降低,应用范围也会进一步的扩展。

近些年来,随着聚合物基复合材料的不断发展、金属基、陶瓷基以及陶瓷—金属基复合材料的开发与应用也被人们越来越重视。这三类复合材料的耐热性能好、强度高,既可用于要求强度高、密度小的场合又可用于制作在高温环境下仍要保持高强度的构件。例如,用高强、高模及耐高温纤维与金属特别是轻金属复合制成金属基复合材料,除具有很高的比强度及比模量等力学性能外,还具有导电性、导热性和低膨胀系数等特点,是

航空航天等高新技术领域的理想结构材料。又比如：由氧化铝—铬陶瓷—金属组成的复合材料，在 1200℃ 的高温下还具有很好的稳定性，所以，这种陶瓷—金属复合材料已被应用在火箭技术上的火焰稳定器，冶金生产上的浇注槽沟、高温热电偶保护套管和涡轮机上的燃气轮机的高温密封装置等。由于这三类复合材料的制造工艺比较复杂，其发展远未达到聚合物基复合材料的水平，因此还需要加强基础研究工作。另外，由碳纤维和碳构成的碳/碳复合材料以其优异的耐高温性能以及耐磨耗性能引起人们的广泛重视并进行深入的研究。

目前复合材料在工业中的应用和科学研究的速度非常快。复合材料的基质已由一般的天然物，如：水泥、石灰、砂土、天然树脂等发展成各种合成的热固性树脂、热塑性树脂及特种耐高温的树脂；增强材料也由矿物纤维、金属纤维发展到玻璃纤维、合成纤维，及至目前的新一代特种纤维。但人们并不满足于这一状况，科学家们又在致力于开拓各种增强材料与基体间的组合，如各种增强体与水泥、树脂、金属、陶瓷和碳基材料的复合以满足航天航空、建筑业材料的更新和开发尖端产品的需要，复合材料在国民经济各个领域中的应用将会更加广泛和重要。

1.2 复合材料的定义、命名及分类

1.2.1 复合材料的定义

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。复合材料是多相材料。它包括基体相和增强相。基体相是一种连续相材料，它把改善性能的增强相材料固结成一体，并起传递应力的作用；增强相一般为分散相，主要起承受应力和显示功能的作用，这两相最终以复合的固相材料出现。复合材料既能保持原组成材料的重要特性，又可通过复合效应使各组分性能相互补充，获得原组分不具备的许多优良性能。

上述定义的复合材料可以由一个连续物理相与一个分散相的复合，也可以是两个或多个连续相与一个或多个分散相在两个连续相中复合的材料。

定义中还明确了复合后的产物为固体材料才称得上复合材料。若复合产物为液体或气体时就不叫复合材料。

1.2.2 复合材料的命名

物应有其名。但历史的发展又往往是事物的发展先于其科学命名，故常先使用一些通俗、形象的名称。如国内 20 世纪 50 年代出现的玻璃纤维复合材料，就被称为“玻璃钢”。其后也出现过种种名称，如玻璃纤维增强塑料、玻璃塑料、玻璃布层压板等。对于一种材料，若其名称很多，互不统一，甚至有的名称含义不确切，就容易引起混乱，造成错觉，不利于材料的应用与发展。

有机化合物发展到现在，人们已经能够根据需要的性质来设计一些化合物的化学结构，并能合成出来。这当然是化学家的贡献，但其中科学的命名法也起了一定的作用。根据 1892 年日内瓦命名法，对已有的有机化合物进行命名的结果，也有助于在已知的化合

物结构的基础上循其规律设计新结构的化合物，并预知其性能。

总结物质命名的原则，应该根据物质的组成、结构和特性的相互关系来确定名称。名称应在一定程度上反映事物的特征。

因此，复合材料可根据增强材料与基体材料的名称来命名。将增强材料的名称放在前面，基体材料的名称放在后面，再加上复合材料。如碳纤维和环氧树脂构成的复合材料，就叫做“碳纤维环氧树脂复合材料”。为书写简便，也可仅写增强材料与基体材料的缩写名称，中间加一斜线隔开，后面再加复合材料。如上述碳纤维和环氧树脂构成的复合材料，也可写做“碳/环氧复合材料”。有时为突出增强材料和基体材料，视强调的组分不同，也可简称为“碳纤维复合材料”或“环氧树脂复合材料”。碳纤维和金属基体构成的复合材料叫做金属基复合材料，也可写为“碳/金属复合材料”。碳纤维和碳构成的复合材料叫“碳/碳复合材料”。

1.2.3 复合材料的分类

随着材料品种的不断增多，人们为了更好地研究和应用材料，就需要对材料进行分类。

材料的分类，历史上已有很多方法。如按材料的化学性质分类，可有金属材料、非金属材料之分。按物理性质分类，可有绝缘材料、磁性材料、透光材料、半导体材料、导电材料、耐高温材料等。按用途分类，可有航空材料、耐烧蚀材料、电工材料、建筑材料、包装材料等。尚有更简单的分类方法，即概括为结构材料与功能材料两大类。

复合材料的分类方法也有不少。如根据增强原理和增强相形态分类，有弥散增强型复合材料、粒子增强型复合材料和纤维增强型复合材料。根据复合过程的性质分类，有化学复合的复合材料、物理复合的复合材料和自然复合的复合材料。根据复合材料的功能分类，有电功能复合材料、热功能复合材料、光功能复合材料等。

一般来说，复合材料常用的分类方法有以下几种。

1.2.3.1 按增强材料的形态分类

①纤维状复合材料。增强材料以纤维状态分散于基体中，可以有长纤维（连续）复合的及短（切断）纤维或晶须状复合的两种类别；

②粒状或碎片状复合材料。增强相是粒状、碎片状材料及其它不规则形状分散于基体中；

③织物状复合材料。增强相可以是无纬布或织物（二向）和多维织物与基体复合；

④无纺布（如纸、毡、无纺布）复合材料。增强材料为毡类、纸类、无纺布类与基体复合。

至于卷制或缠绕等属于按加工方法的不同而分类，如可分为：卷制或缠绕复合材料；预浸无纬布型复合材料；织物型复合材料，层压型复合材料；拉拔型复合材料；挤出型复合材料；混合型复合材料等。

1.2.3.2 按增强纤维种类分类

①无机纤维（如玻璃纤维、碳纤维及其它陶瓷纤维、矿物纤维等）复合材料；

②有机纤维（如芳香族聚酰胺纤维、芳香族聚酯纤维、高强度聚烯烃纤维等）复合

材料；

- ③金属纤维（如钨丝、不锈钢丝等）复合材料；
- ④陶瓷纤维（如氧化铝纤维、碳化硅纤维、硼纤维等）复合材料；
- ⑤其它，如各种天然植物纤维等。

此外，如果用两种或两种以上纤维增强同一基体制成的复合材料称为混杂纤维复合材料。混杂复合材料可以看成是两种或多种单一纤维复合材料的相互复合，即复合材料的“复合材料”。

1.2.3.3 按基体材料分类

- ①聚合物基复合材料。以有机聚合物（主要为热固性树脂、热塑性树脂及橡胶）为基体制成的复合材料；
- ②金属基复合材料。以金属为基体制成的复合材料，如钢基复合材料、铝基复合材料、钛基复合材料等；
- ③陶瓷基复合材料。以陶瓷材料（也包括玻璃和水泥）为基体制成的复合材料；
- ④碳基复合材料。用易于在高温下烧制成碳质材料的物质为基体，和沥青纤维等复合的材料。

1.2.3.4 按材料作用分类

- ①结构复合材料。用于制造受力构件的复合材料；
- ②功能复合材料。具有各种特殊性能（如阻尼、导电、导磁、摩擦、屏蔽等）的复合材料。

复合材料的构成材料之一为纤维者称为纤维复合材料，因纤维多有增强的作用，所以也叫做纤维增强复合材料，它在复合材料中用的最多、最广。由纤维和基体经组合可得到各种复合材料，如表 1-2 所示。

表 1-2 由各种组合而得到的复合材料

增强纤维	基 体
金属纤维：钢、硼、晶须等	纤维增强水泥——水泥
有机纤维：人造纤维、尼龙、芳纶等	纤维增强金属——金属
	纤维增强塑料——树脂
无机纤维：玻璃、碳、碳化硅等	纤维增强橡胶——橡胶

在一般的纤维增强复合材料中，作为结构材料，最实用的是以热固性树脂为基体的纤维增强复合材料（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复合材料（FRTP）。以金属为基体的纤维增强金属复合材料（FRM），由于它的耐高温特性和高的刚性和尺寸稳定性，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材料（FRC）正在作为建筑材料使用。众所周知的纤维增强橡胶（FRR）则主要是大量用于汽车轮胎和输送带中。

1.3 复合材料的特性

复合材料是由两种或两种以上的不同性质的材料组合而成的。通过材料的选择和匹配及最佳的结构设计可以综合体现出下列特性。

1.3.1 比强度和比模量

复合材料的突出特点是比强度与比模量高。比强度是抗拉强度与密度之比，比强度高的材料能够承受高的应力；比模量是弹性模量与密度之比，比模量高说明材料轻而且刚性大。比如，高模量碳纤维/环氧复合材料的比强度为钢的五倍，铝合金的四倍，钛合金的三倍半。其比模量是铜、铝、钛的四倍。

1.3.2 抗疲劳性能

疲劳是材料在循环应力作用下的性能。图 1-1 表示几种材料的疲劳曲线，可见碳纤维复合材料的抗疲劳性能是最好的。

抗疲劳性能好的原因主要是由于缺陷少的高性能碳纤维的抗疲劳性好，其次是由于基体材料的塑性好，能消除或减小应力集中区的尺寸和数量，使疲劳源（纤维和基体中的缺陷处等）难以萌生出微裂纹，限制微裂纹的出现。即使是微裂纹出现，如图

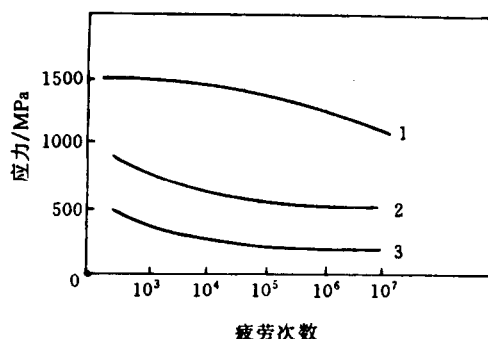


图 1-1 几种材料的疲劳曲线

1—碳纤维复合材料 2—玻璃纤维复合材料 3—铝合金

1-2 (a) 所示，塑性变形也能使裂纹尖端钝化，减缓其扩展。在裂纹缓慢扩展的过程中基体的纵向拉压会引起其横向的缩胀，而在裂纹尖端的前缘造成基体与纤维的分离，〔见图

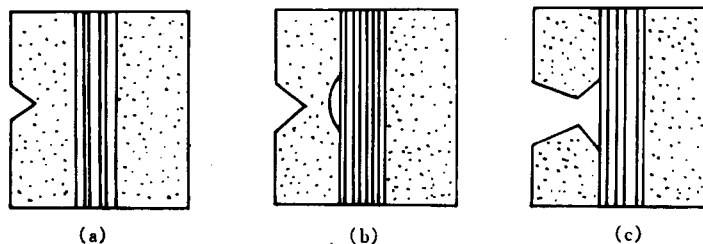


图 1-2 复合材料中疲劳裂纹扩展示意图

1-2 (b)〕，所以经过一定的应力循环之后，裂纹由横向改沿纤维—基体界面纵向扩展〔见图 1-2 (c)〕由于基体中分布着大量纤维，裂纹的扩展常常经历非常复杂和曲折的路径。其疲劳破坏是从纤维的薄弱环节开始，逐步扩展到界面上，破坏前有明显的前兆。因此，纤维复合材料的疲劳强度比较高。一般金属材料的疲劳强度极限是其抗张强度的 30%~

50%，而碳纤维复合材料的疲劳强度为其抗张强度的 70%~80%。

1.3.3 减振性能

构件的自振频率除了与其本身结构有关之外，还同材料弹性模量与密度之比（即比模量）的平方根成正比。由于复合材料的比模量大，所以它的自振频率很高，在通常加载速度或频率条件下不容易出现因共振而快速脆断的现象。同时，复合材料是一种非均质的多相体系，其中有大量的纤维与基体之间的界面。由于界面对振动有反射和吸收作用，所以复合材料的振动阻尼性强，即使激起振动也能很快衰减。而且复合材料的自振动频率高，不易产生共振现象。对相同形状和尺寸的梁进行振动试验得知，轻合金梁需要九秒钟才能停止振动，而碳纤维复合材料梁只需要 2~3 秒钟就停止了同样大小的振动。

1.3.4 过载安全性

在纤维复合材料当中，由于有大量独立的纤维，在每平方厘米面积上的纤维数少至几千根，多达数万根。当超载时复合材料中即使有少量纤维断裂时，载荷就会迅速重新分配到未被破坏的纤维上，不至于造成构件在瞬间完全丧失承载能力而断裂，仍能安全使用一段时间。

1.3.5 高温性能

增强材料可选具有较高的熔点、弹性模量和较高的高温强度的纤维。常用的一些增强纤维的强度随温度的变化如图 1-3 所示。

一般来说，金属铝在 400~500℃ 以后就完全丧失强度，但用连续硼纤维或碳化硅纤维增强的铝基复合材料，在这样的温度下仍具有较高的强度。当用钨纤维增强钴、镍或它们的合金时，就可把这些金属的使用温度提高到 1000℃ 以上。陶瓷基纤维复合材料可以承受 1200~1400℃ 的高温，而碳/碳复合材料的耐热温度可达 3000℃（在真空或惰性气体保护下）左右。

此外，由于复合材料高温强度好、耐疲劳性能好以及纤维与基体的相容性好，所以，它的热稳定性能也是很好的。

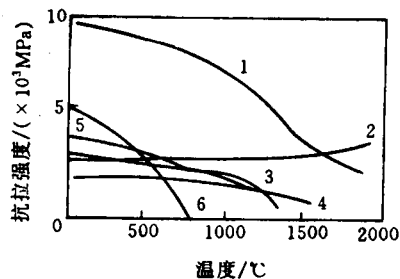


图 1-3 几种纤维的高温强度

1—氧化铝晶须 2—碳纤维 3—钨纤维
4—碳化硅纤维 5—硼纤维 6—钠玻璃纤维

1.3.6 具有可设计性

复合材料还有一个突出的特点是可以具备各向异性的性能。与之相关的就是性能的可设计性。通过改变纤维、基体的种类及体积含量、纤维的排列方向、铺层次序等就可以满足对复合材料结构与性能的各种设计要求。

1.4 对高性能复合材料的期望及开发现状

如前所述,复合材料的种类是非常多的,现在已经生产各种组合的复合材料。不言而喻,不同种类的复合材料具有不同的性能特性。聚合物基复合材料(也称纤维—树脂复合材料)由于其固有的优点,是复合材料中发展得最迅速、应用最广泛的一类复合材料。我们就以聚合物基复合材料为例,来介绍一下对高性能复合材料的期望及高性能复合材料的开发现状。

1.4.1 对高性能复合材料的期望

1.4.1.1 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

纤维增强聚合物基复合材料的比强度、比刚度虽然很大,但这仅限于单向增强材料的纤维方向的特性。因为增强纤维材料有一大部分是各向异性类型(如碳纤维、硼纤维等),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是极低的。然而,若是只受到单向应力时,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。复合材料纤维方向的刚性,根据复合法则,与纤维刚性成正比,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作为选择的基准。

表 1-3 指出了各种结构件受到各种载荷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载荷时,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。载荷极限随采取的强度基准或变形量、屈曲值基准的不同而异,也随结构形态和载荷的种类而异。由表 1-3 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。

表 1-3 结构件的材料指标

构 件	载 荷	极限条件	指 标	备 注
棒	拉伸	破坏	$\sigma_{\text{张}}/\rho$	强度指标
棒	拉伸	延伸	E/ρ	变形指标
棒	弯曲	破坏	$\sqrt{\sigma_{\text{张}}}/\rho$	强度指标
棒	弯曲	挠曲	$\sqrt[3]{E}/\rho$	变形指标
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

在这种意义上,也可以说希望开发重量轻、强度和纵向弹性模量高的纤维。现在开发出来的典型的高性能增强纤维如表 1-4 所示。

表 1-4

增强用纤维的性能

纤维种类	熔点/℃	密度/(g/cm ³)	拉伸强度/GPa	弹性模量/GPa
E 玻璃纤维	700	2.55	3.6	74
S 玻璃纤维	840	2.50	4.6	84
碳纤维 (高强)	3650	1.75	3.0	240
碳纤维 (高模)	3650	1.90	2.5	450
氮化硼纤维	2980	1.90	1.4	90
碳化硅纤维	2960	2.55	3.0	200

如表 1-5 中各种高比强度材料的比较所示,以玻璃纤维增强的复合材料,它的最大弱点是刚度差,即使是比刚度也不如通常的金属材料。也就是说,如果常用的玻璃纤维的 $E_f=7300\text{MPa}$,那么对于以聚合物为基体的玻璃纤维复合材料来说,设纤维的体积含量为 V_f ,根据复合原则,则复合材料的弹性模量 $E=E_fV_f+E_m(1-V_f)$,若取聚合物的 $E_m=300\text{MPa}$,那么,即使是 $V_f=55\%$,纤维方向上的弹性模量 $E=4200\text{MPa}$,密度即使轻至 2.0,则 $E/\rho=2100$,还是不如金属材料。

表 1-5

各种高比强度材料的强度和刚度的比较

材料种类	密度	拉伸强度	纵向弹性模量	强度指标		刚度指标		
	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	σ_R/MPa	E/MPa	σ_R/ρ	$\sqrt{\sigma_R}/\rho$	E/ρ	$\sqrt{E}/\rho$	$\sqrt[3]{E}/\rho$
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	4.4	100	11200	22.7	2.3	2550	24.1	5.1
玻璃纤维单向增强材料	2.0	140	4200	70	5.9	2100	32.4	8.1
增强材料玻璃布层合材料	2.0	70	2100	35	4.2	1050	22.9	6.4
碳纤维单向增强材料	1.6	160	14000	100	7.9	8750	74.0	15.1
芳 纶 单向增强材料	1.3	130	7000	100	8.8	5380	64.4	14.7

因此,在开发碳纤维时,首先考虑的不仅仅是比强度,而且是更希望得到高比刚度的复合材料所用的增强纤维。对于硼纤维来说,由于成本较高,而且直径粗至 0.1mm,所以应用不如碳纤维广泛。

现在,一种被称为晶须的单晶体短纤维也被人们应用在复合材料当中。晶须本身的拉伸强度和弹性模量极大,但生产率低,价格高,成型困难,目前还不能成为工业材料。

继碳纤维之后,美国杜邦公司开发出了芳纶纤维 (kevlar)。尽管芳纶纤维的特性不如碳纤维,但因其相对密度更小,目前的生产成本又比碳纤维低,所以应用也比较广泛。

其它的纤维还有碳化硅纤维、氧化铝纤维,超高相对分子质量聚乙烯纤维及金属纤维等。这些都是在复合材料中很有发展前景的纤维,将会成为今后期待的材料,在第 3 章