



工程材料应用技术丛书

复合材料 及其工程应用

车剑飞 黄洁雯 杨娟 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



工程材料应用技术丛书

复合材料及其工程应用

车剑飞 黄洁雯 杨 娟 编



机械工业出版社

本书主要介绍了复合材料的主要类型、性能特点及其工程应用。全书内容包括：聚合物基复合材料、金属基复合材料、无机非金属物基复合材料，以及复合材料在机械工程、交通运输、电子电器、建筑工业、石油化学工业、航空航天中的应用。本书叙述简明，层次清晰，内容丰富翔实，是一本应用性强、技术新的复合材料工程应用技术图书。

本书可供机械、交通运输、电子、建筑、石油化工等领域的工程技术人员、管理人员及购销人员使用，也可供相关专业的在校师生和研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料及其工程应用/车剑飞, 黄洁雯, 杨娟编.
—北京: 机械工业出版社, 2006.8
(工程材料应用技术丛书)
ISBN 7-111-19526-4

I. 复… II. ①车…②黄…③杨… III. 复合材
料 IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 075641 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 陈保华

责任编辑: 白 刚 版式设计: 张世琴 责任校对: 程俊巧

封面设计: 马精明 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 8 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm × 239mm · 10.875 印张 · 423 千字

0 001—4 000 册

定价: 32.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379644

封面无防伪标均为盗版

前 言

复合材料在复合过程中既综合各组分材料的优点,又减少其不利影响,同时经过专门的设计,还可以赋予复合材料光、电、磁、热等特殊功能,使得复合材料向着复合化、高性能化、功能化、结构-性能一体化和智能化方向发展。优化的复合工艺使设计者从传统材料的选择和制造的束缚中解放出来,使人们使用更轻、更韧的材料,其性能能够通过综合平衡来满足实际设计的需要。

复合材料正在提高和扩展各工程领域设计者的水平,尽管这种提高和扩展的程度目前仍不易觉察,所幸的是各行各业的工程设计人员开始逐渐了解复合材料的基本知识,并在他们的设计中渐渐地有意识地引入复合材料的概念。事实上复合材料确实给各类工程设计提供了一些解决困难的新方法,并赋予这些设计新的理念。

对于现代材料而言,材料是物质,设计是意念,制造是途径,应用才是目的。有感于复合材料应用领域的扩大,新产品、新技术不断出现,在原材料领域也有不少变化,产品性能提高较大,因而编写了这本以复合材料工程应用为背景的书籍,力图正确描述材料与应用之间的关系,以便于有关工程技术人员能够认识、掌握和应用复合材料。

本书的主要读者对象是企业工程技术人员、从事相关管理与购销工作的人员,同时可供相关专业的大专院校学生参考。本书在介绍复合材料性能的基础上,详细论述了复合材料在机械工程、交通运输、电气工程、建筑工业、化工和航空航天中的应用与制品设计。

本书第1、5章由车剑飞(南京理工大学)编写,第3、4、6、7章由黄洁雯(南京理工大学)编写,第2、9、10章由杨娟(江苏大学)编写,第8章由杨娟、车剑飞编写,全书由车剑飞统稿。在本书的编写过程中,潘安波、董晓明、刘芹芹做了大量资料搜集工作,另外本书参考了大量文献资料,书中仅列出了主要参考文献,对于所有参考文献的作者,编者在此一并致以诚挚的谢意。

由于复合材料的应用范围较广,涉及较多其他工程技术领域的知识,以及作者水平所限,书中难免有缺点和错误之处,敬请各界读者批评指正。

编 者
2006年3月

目 录

前言

第1章 复合材料总论	1
1.1 复合材料的定义、命名及分类	1
1.2 复合材料的性能特点	3
1.2.1 复合材料的性能可设计性	3
1.2.2 材料与构件制造的一致性	4
1.2.3 优异的物理化学性能	4
1.3 复合材料的基体	6
1.3.1 聚合物基体	6
1.3.2 金属基体	8
1.3.3 陶瓷基体	9
1.4 复合材料的增强材料	10
1.4.1 玻璃纤维	11
1.4.2 碳纤维	14
1.4.3 芳纶纤维	16
1.4.4 超高分子量聚乙烯纤维	17
1.4.5 硼纤维	18
1.4.6 碳化硅纤维	20
1.4.7 晶须增强体	21
1.4.8 纳米超微粒子	23
1.5 复合材料的界面工程	25
第2章 聚合物基复合材料	29
2.1 聚合物基复合材料的树脂基体	29
2.1.1 不饱和聚酯树脂	29
2.1.2 环氧树脂	33
2.1.3 酚醛树脂	40
2.1.4 热塑性树脂基体	42
2.2 聚合物基复合材料的成型工艺	45
2.2.1 聚合物基复合材料的成型工艺特点	47
2.2.2 手糊成型工艺	49
2.2.3 喷射成型工艺	52
2.2.4 树脂传递模塑成型	53

2.2.5 缠绕成型	54
2.2.6 拉挤成型	56
2.2.7 模压成型	57
2.2.8 其他成型工艺	58
2.3 聚合物基复合材料的后加工工艺	60
2.3.1 机械连接	60
2.3.2 胶接	63
2.3.3 焊接	66
2.4 聚合物基复合材料的性能特点	67
2.4.1 聚合物基复合材料的力学性能	67
2.4.2 复合材料的断裂、冲击和疲劳	72
2.4.3 聚合物基复合材料的热性能	75
2.4.4 聚合物基复合材料的电磁性能	80
2.4.5 聚合物基复合材料的化学稳定性能	83
2.4.6 聚合物基复合材料的其他物理性能	86
第3章 金属基复合材料	88
3.1 金属基复合材料的制备工艺	88
3.1.1 概述	88
3.1.2 固态制备方法	89
3.1.3 液态制备方法	93
3.1.4 新型制备方法	96
3.2 铝基复合材料	98
3.2.1 铝及铝合金	98
3.2.2 长纤维增强铝基复合材料	100
3.2.3 短纤维增强的铝基复合材料	104
3.2.4 晶须和颗粒增强的铝基复合材料	105
3.3 镁基复合材料	107
3.3.1 镁及镁合金	107
3.3.2 镁基复合材料的性能及应用	108
3.4 钛基复合材料	110
3.4.1 钛及钛合金	110
3.4.2 钛基复合材料的性能及应用	111
第4章 无机非金属物基复合材料	112
4.1 陶瓷基复合材料	112
4.1.1 概述	112
4.1.2 主要的陶瓷基体及增强体材料	113
4.1.3 陶瓷基复合材料的补强增韧机制	113

4.1.4 陶瓷基复合材料的制造方法	116
4.1.5 陶瓷基复合材料的性能	122
4.1.6 陶瓷基复合材料的应用	128
4.2 碳/碳复合材料	128
4.2.1 概述	128
4.2.2 碳/碳复合材料的制备方法	129
4.2.3 碳/碳复合材料的性能	134
第5章 复合材料在机械工程中的应用	138
5.1 通用机械设备的零部件	138
5.1.1 复合材料齿轮	138
5.1.2 复合材料轴承	141
5.2 复合材料摩擦学部件	144
5.2.1 复合镀层	144
5.2.2 复合材料固体润滑部件	146
5.2.3 复合材料密封材料	151
5.2.4 复合材料制动件	152
5.3 复合材料发动机零部件	157
5.3.1 发动机罩	158
5.3.2 发动机机体	159
5.3.3 空气吸进系统	159
5.3.4 燃油系统	160
5.3.5 冷却系统	161
5.3.6 传动系统	162
5.3.7 其他发动机部件	163
5.4 复合材料模具	164
5.4.1 环氧树脂基复合材料模具	164
5.4.2 多孔负压复合材料模具	166
5.5 高阻尼复合材料	167
5.5.1 复合阻尼钢板	167
5.5.2 复合材料板弹簧	167
第6章 复合材料在交通运输中的应用	169
6.1 复合材料在汽车工业中的应用	169
6.1.1 复合材料在汽车壳体中的应用	171
6.1.2 复合材料在汽车发动机周边的应用	175
6.1.3 复合材料在汽车保险杠中的应用	177
6.1.4 复合材料在车内制品中的应用	178
6.1.5 新型复合材料汽车构件	180

6.2 复合材料在自行车中的应用	182
6.2.1 自行车用复合材料	182
6.2.2 碳纤维复合材料自行车	184
6.3 复合材料在船舶工业中的应用	188
6.3.1 研制与应用概况	188
6.3.2 船用复合材料的成型工艺	191
6.3.3 复合材料船舶及其应用实例	195
第7章 复合材料在电子电器中的应用	203
7.1 复合材料电子功能材料	203
7.1.1 印制电路板	203
7.1.2 天馈系统	209
7.1.3 电磁屏蔽材料	213
7.1.4 吸波隐身材料	215
7.1.5 复合材料电子元件	218
7.2 复合材料电器设备零件	219
7.2.1 复合材料绝缘电器零件	220
7.2.2 复合电缆及线材	224
7.2.3 复合材料发电机护环	225
7.2.4 其他复合材料电器设备	226
第8章 复合材料在建筑工业中的应用	229
8.1 建筑工业用复合材料概述	229
8.1.1 新型建筑结构的发展对建筑材料的要求	229
8.1.2 建筑工业用复合材料的性能特点	230
8.1.3 建筑用复合材料的应用分类	231
8.2 复合材料建筑结构	232
8.2.1 复合材料建筑承重结构	232
8.2.2 复合材料建筑围护结构	235
8.2.3 纤维增强混凝土	238
8.2.4 相变复合储能材料在建筑中的应用	241
8.3 复合材料装饰装修材料	241
8.3.1 屋顶装饰	241
8.3.2 墙面及地板、天花板装饰	243
8.3.3 复合材料浮雕与雕塑	245
8.4 复合材料门、窗及家具	246
8.4.1 钢塑复合保温窗	247
8.4.2 复合材料门、窗	248
8.4.3 复合材料护栏、楼梯扶手	250

8.4.4 复合材料家具	250
8.5 透光复合材料	251
8.5.1 概述	252
8.5.2 透光复合材料结构	254
8.5.3 透光复合材料在工业建筑中的应用	257
8.5.4 透光复合材料在民用建筑中的应用	259
8.5.5 透光复合材料的其他应用	259
8.6 复合材料建筑管道	261
8.6.1 铝塑复合管	262
8.6.2 钢塑复合管	263
8.6.3 其他复合管	264
8.7 复合材料卫生洁具	265
8.7.1 卫生洁具用复合材料	266
8.7.2 复合材料浴缸	268
8.7.3 玻璃钢整体浴室	271
8.8 复合材料在土木建筑中的应用	272
8.8.1 复合材料在桥梁工程中的应用	273
8.8.2 复合材料在修复与加固工程中的应用	276
8.8.3 复合材料在土木建筑上的智能化作用	279
第9章 复合材料在石油化学工业中的应用	281
9.1 石油化工用复合材料的耐腐蚀性	281
9.2 复合材料在化工管道中的应用	285
9.2.1 概述	285
9.2.2 复合材料管道在石油工业上的应用	288
9.2.3 复合材料管道在化学工业上的应用	290
9.2.4 复合材料管道在城市管道和农业灌溉中的应用	293
9.3 复合材料阀门和泵	295
9.3.1 复合材料阀门	295
9.3.2 复合材料泵	297
9.4 复合材料在化工容器上的应用	300
9.4.1 概述	300
9.4.2 大型拼装式玻璃钢容器	301
9.4.3 钢/聚四氟乙烯复合烧结件容器	303
9.4.4 复合材料水箱	304
9.4.5 复合材料贮罐	306
9.4.6 玻璃钢压力容器	309
9.4.7 玻璃钢塔器	310

第 10 章 复合材料在航空航天中的应用	313
10.1 航天航空用复合材料的应用特点	313
10.1.1 显著的减重效应	313
10.1.2 结构-功能一体化	315
10.1.3 成型工艺性	316
10.1.4 应用发展趋势	317
10.2 复合材料在飞机上的应用	318
10.2.1 军用飞机	318
10.2.2 民用飞机	321
10.2.3 直升机	323
10.3 复合材料在航天上的应用	325
10.3.1 人造地球卫星	325
10.3.2 太空站	326
10.3.3 天地往返运输系统	326
10.4 复合材料在火箭上的应用	327
10.4.1 运载火箭箭体材料	327
10.4.2 战略导弹弹头材料	328
10.4.3 复合材料在火箭发动机中的应用	330
参考文献	336

第 1 章 复合材料总论

复合材料是应现代科学技术发展涌现出的具有极大生命力的材料，具有刚度大、强度高、重量轻的优点，而且可根据使用条件的要求进行设计和制造，以满足各种特殊用途，从而极大地提高工程结构的效能，已成为一种当代新型的工程材料。

复合材料的历史一般可以分为两个阶段，即早期复合材料和现代复合材料。早期复合材料的历史较长，很多实例散见于现存的历史遗迹中，并且多少可以从中发现现代复合材料的思想萌芽。现代复合材料是材料历史中合成材料时期的产物，这里所说的现代复合材料不包括天然复合材料和许多历史遗迹中所发现的所谓早期复合材料。学术界开始使用“复合材料”(Composite Materials)一词大约是在 20 世纪 40 年代，当时出现了玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂，开辟了现代复合材料的新纪元。由 20 世纪 60 年代开始陆续开发出多种高性能纤维。20 世纪 80 年代以后，由于人们丰富了设计、制造和测试等方面的知识和经验，加上各类作为复合材料基体的材料的使用和改进，使现代复合材料的发展达到了更高的水平，即进入高性能复合材料的发展阶段。

目前蓬勃发展的复合材料技术就是用原有的金属材料、无机非金属材料和高分子材料等作为组分，通过一定的工艺方法将它们复合在一起，制成既能保留原有材料组分的特性，又可以克服组分材料的不足，还能显示出某些新性能的材料。

复合材料技术的出现是近代材料科学的伟大成就，也是材料设计技术的一个重大突破。

1.1 复合材料的定义、命名及分类

什么是复合材料？给复合材料下一个严格、精确而又统一的定义一直是材料界存在争议的问题。随着复合材料的不断发展，复合材料在不断完善它的内涵和外延。从广义上讲，复合材料是由两种或两种以上不同化学性质的组分组合而成的材料。但在现代材料学界中，复合材料专指由两种或两种以上不同相态的组分所组成的材料。复合材料定义为：用经过选择的一定数量比的两种或两种以上的组分（或称组元），通过人工复合，组成多相、三维结合且各相之间有明显界面的、具有特殊性能的材料。

上述复合材料的定义较易被普遍接受,它不仅明确指出复合材料是“通过人工复合的”和“有特殊性能的”材料,而且还指出了复合材料的组分、结构特点及与其他种材料(如简单混合物、化合物、合金)的特征区别。根据复合材料的定义,我们可以从下列几点来进一步了解复合材料的特点:

- 1) 复合材料的组分和它们的相对含量是经人工选择和设计的。
- 2) 复合材料是经人工制造而非天然形成的(区别于具有某些复合材料形态特征天然物质)。
- 3) 组成复合材料的某些组分在复合后仍然保持其固有的物理和化学性质(区别于化合物和合金)。
- 4) 复合材料的性能取决于各组成相性能的协同。复合材料具有新的性能,这种性能是单个组分材料性能所不及或不同的。
- 5) 复合材料是各组分之间被明显界面区分的多相材料。

根据上述的复合材料定义,复合材料应不包括自然形成具有某些复合材料形态的物质、化合物、单相合金和多相合金。

根据关于复合材料的定义,对它的命名是以复合材料的相为基础,命名的方法是将增强相或分散相材料放在前,基体相或连续相材料放在后,之后再缀以“复合材料”。如由碳纤维和环氧树脂构成的复合材料称为“碳纤维环氧复合材料”,通常为了书写简便,在增强相材料与基体相材料中间划一个半字线(或斜线)再加“复合材料”。如碳纤维环氧复合材料可写作:“碳纤维-环氧复合材料”,更简化一点可写成“碳-环氧”;硼纤维与铝构成的复合材料称为“硼纤维铝复合材料”,简称为“硼-铝”,余者类推。

由金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料的不同形态相组合,可构成各种不同的复合材料体系。按不同的标准和要求,复合材料通常有以下几种分类法:

- (1) 按使用性能不同分类 结构复合材料;功能复合材料等。
- (2) 按基体材料类型分类 树脂基复合材料;金属基复合材料;无机非金属基复合材料等。
- (3) 按分散相的形态分类 连续纤维增强复合材料;纤维织物、编织体增强复合材料;片状材料增强复合材料;短纤维或晶须增强复合材料;颗粒增强复合材料;纳米复合材料等。
- (4) 按增强纤维类型分类 碳纤维复合材料;玻璃纤维复合材料;有机纤维复合材料;陶瓷纤维复合材料等。

此外还有一些专指某些范围的名称,如近代复合材料、先进复合材料等。

常用的复合材料分类方法详见图 1-1 和图 1-2。

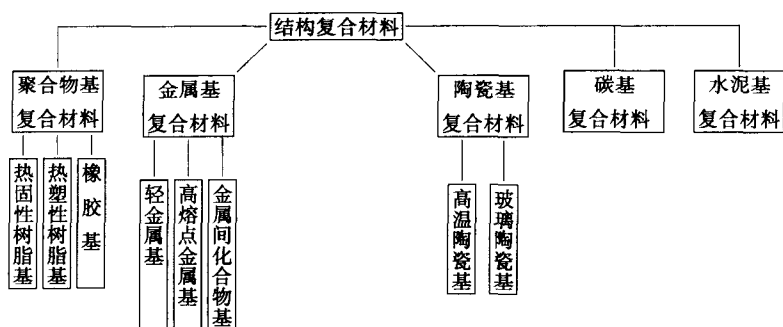


图 1-1 结构复合材料按不同基体分类

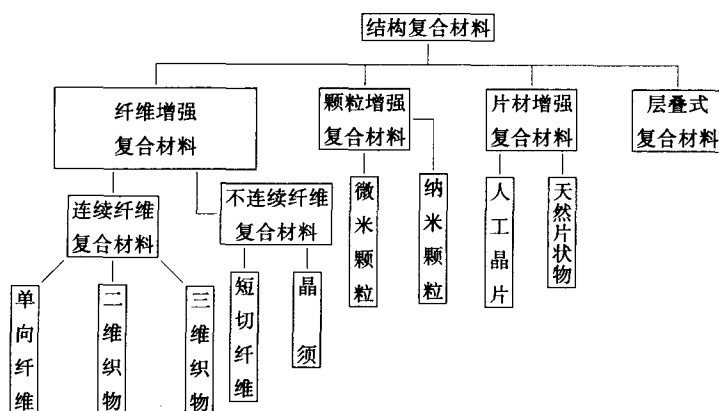


图 1-2 结构复合材料按不同增强体形式分类

1.2 复合材料的性能特点

复合材料与传统材料相比，其两个主要特点是性能可设计性和材料与构件成型的一致性。复合材料所期望的复合效果是原材料（即组分材料）的性能互补，并产生叠加效果，从而具备一些原材料所不具备的优异的物化性能。

1.2.1 复合材料的性能可设计性

材料设计是指在材料科学的理论知识和已有经验的基础上，按预定性能要求，确定材料的组分和结构，并预测达到预定性能要求应选择的工艺手段和工艺参数。通过改变材料的组分、结构、工艺方法和工艺参数来调节材料的性能，就是材料性能的可设计性。显而易见，复合材料中所包含的诸多影响最终性能的、可调节的因素，赋予了复合材料的性能可设计性以极大的自由度。

复合材料设计的首要步骤是选择构成复合材料的基本组分（增强材料和基

体)。这一步骤可简称为选材。它包括确定增强材料和基体的种类(即确定复合体系),并根据复合体系初步确定增强材料在复合材料中的体积分数(即各组元之间的体积比例)。选材的目的是根据复合材料中各组分的职能和所需承担的载荷及载荷分布情况,再根据所了解的具体使用条件下要求复合材料提供的各种性能,来确定复合材料体系。

铺层设计是根据受力要求和刚度(变形)要求,通过承受指定载荷下各层应力分布、强度与变形来确定某种铺叠次序下层合板的承载能力与变形,从而确定增强体在复合材料中的理想配置与铺叠次序:除颗粒增强复合材料外,定向的晶须和长纤维复合材料的力学及物理性质是非均质和各向异性的,与可视为均质的和各向同性的传统材料有显著不同,这是复合材料可以进行铺层设计的主要依据。复合材料可以根据结构各部分工作环境及载荷类型与大小,分别选用和配置不同的增强材料和基体。材料性能梯度变化的思想,使复合材料优化设计更臻完善。传统材料只能选择现有的牌号和规格,在这一点上,复合材料将赋予结构设计者更大的自由度,也为力学工作者提供了更广阔的施展才华的空间。

1.2.2 材料与构件制造的一致性

将通过材料设计的复合材料组分(增强材料和基体)和配比(即相对体积含量)确定后,根据铺层设计的要求对其进行排列和配置,经复合(即组合或制造)以后,就可以得到复合材料的构件。传统材料构件需先选用以板、块、棒、管和型材等形式供应的材料,再将这些材料经各种加工制成构件。与此显著不同的是,复合材料与复合材料构件是同时成型,即在采用某种方法把增强材料掺入基体形成复合材料的同时,通常也就形成了复合材料的构件,称为复合材料与构件制造的一致性。制造复合材料与制造构件往往是同步的。根据构件形状设计模具,再根据铺层设计来敷设增强材料,使基体材料与增强材料组合、固化后获得复合材料构件,这种制造过程称为一次成型。构件的连接(螺接、铆接、焊接、粘接等)、机械切削加工及坯件的进一步塑性变形(主要是金属基复合材料的挤制、轧制和滚压)称为复合材料的后加工。多数复合材料不必经过后加工。一次成型后,复合材料构件即可供直接使用的成型方法称为净成型。

1.2.3 优异的物理化学性能

复合材料由多种组分的材料组成,许多性能优于单一组分材料。为了便于读者尽快地了解复合材料的优异性能,简述如下,详细的性能可见聚合物基、金属基、陶瓷基复合材料各章的论述。

1. 轻质高强

普通碳钢的密度为 7.8g/cm^3 。玻璃纤维增强树脂基复合材料的密度为 $1.5\sim$

$2.0\text{g}/\text{cm}^3$ ，只有普通碳钢的 $1/4 \sim 1/5$ ，比铝合金还要轻 $1/3$ 左右，而机械强度都能超过普通碳钢的水平。若按比强度计算（强度与密度的比值），玻璃纤维增强的树脂基复合材料不仅大大地超过碳钢，而且可以超过某些特殊合金钢。碳纤维复合材料、有机纤维复合材料具有比玻璃纤维复合材料更低的密度和更高的强度，因此具有更高的比强度。这种优异的比强度、比模量（弹性模量与密度的比值），使制品设计的轻量化成为可能。

2. 耐化学腐蚀

很多种复合材料都能耐酸碱腐蚀，如玻璃纤维增强酚醛树脂复合材料，在含氯离子的酸性介质中能长期使用，可用来制造耐强酸、盐、酯和某些溶剂的化工管道、泵、阀、容器、搅拌器等设备，如用耐碱玻璃纤维或碳纤维与树脂基体复合，还能在强碱介质中使用。

3. 抗疲劳性能好

疲劳破坏是材料在变载荷作用下，由于裂缝的形成和扩展而形成的低应力破坏。金属材料的疲劳破坏是由里向外突然发展的，事前没有任何预兆；而纤维复合材料中纤维与基体的界面能阻止裂纹扩展，因此其疲劳破坏总是从纤维的薄弱环节开始，逐渐扩展到结合面上，破坏前有明显的预兆。大多数金属材料的疲劳极限是其拉伸强度的 $40\% \sim 50\%$ ，而碳纤维聚酯树脂复合材料则达 $70\% \sim 80\%$ 。此外，纤维复合材料的抗声振疲劳也是很好的。

4. 减振性能好

结构的自振频率除与结构本身形状有关外，还与材料比模量的平方根成正比。高的自振频率避免了工作状态下共振而引起的早期破坏。同时，复合材料中纤维与基体界面具有吸振能力，因此其振动阻尼很高。根据对相同形状和尺寸的梁进行试验可知，轻金属合金梁需 9s 才能停止的振动，碳纤维复合材料只需 2.5s 就静止了。

5. 减摩耐磨自润滑

许多高分子材料的分子链间由范德华力或氢键相连，相互作用力较弱，容易产生相对运动，因此高分子材料大都具有极低的摩擦系数，且静摩擦系数远小于或相当于动摩擦系数，自润滑性能好。采用填充改性剂对工程塑料基材进行增强、复合、共混，可以有效地改善工程塑料的减摩耐磨性能。在热塑性塑料中掺入少量短切碳纤维可提高其耐磨性，其增加的倍数为聚氯乙烯本身的 3.8 倍；聚四氟乙烯本身的 3 倍；聚丙烯本身的 2.5 倍；聚酰胺本身的 1.2 倍；聚酯本身的 2 倍。

由于常规微米级颗粒脱落滞留在摩擦界面后，容易造成严重的磨料磨损，改用纳米颗粒是这类复合材料的一个发展方向。通过纳米分散技术的发展，将能保证纳米粒子作用的发挥，阻止高分子材料层状脱粘磨损。此外，在材料表面磨损

时脱粘的纳米填料因具有很强的表面活性,而易于与对偶结合形成细密的薄层,这些因素均有利于大大减缓复合材料的磨损。

6. 绝缘、导电和导热性

玻璃纤维增强塑料是一种优良的电气绝缘材料,用于制造仪表、电机与电器中的绝缘零部件;这种材料还不受电磁作用,不反射无线电波,微波透过性良好,还具有耐烧蚀性、耐辐照性,可用于制造飞机、导弹和地面雷达罩。金属基复合材料具有良好的导电和导热性能,可以使局部的高温热源和集中电荷很快扩散消失,有利于解决热气流冲击和雷击问题。

7. 耐热性好

碳纤维增强树脂复合材料的耐热性比树脂基体有明显提高,而金属基复合材料在耐热性方面更显示出其优越性。碳化硅纤维、氧化铝纤维与陶瓷复合,在空气中能耐 1200~1400℃ 高温,要比所有超高温合金的耐热性高出 100℃ 以上。用于柴油发动机,可取消原来的散热器、水泵等冷却系统,减轻重量约 100kg;用于汽车发动机,使用温度可高达 1370℃。

1.3 复合材料的基体

聚合物基体是复合材料中的一个重要组分。在复合材料成型过程中,基体经过复杂的物理、化学变化过程,与增强纤维复合成具有一定形状的整体,因而基体性能直接影响复合材料性能。基体的主要作用包括:将纤维粘合成整体并使纤维位置固定,在纤维间传递载荷,并使载荷均衡;决定复合材料的一些性能,如复合材料的高温使用性能(耐热性)、层间剪切性能、耐介质性能(如耐水、耐化学品性能)等;决定复合材料成型工艺方法及工艺参数选择;保护纤维免受各种损伤。此外对复合材料一些性能有重要影响,如纵向拉伸、压缩性能、疲劳性能、断裂韧性等。

1.3.1 聚合物基体

聚合物基复合材料又称树脂基复合材料或高聚物基复合材料。它以树脂为基体,以纤维、织物等为增强体。聚合物基复合材料已经成为重要的工程结构材料,与传统材料相比,具有高比强度,高比模量,可设计性,热膨胀系数低,耐腐蚀,耐疲劳等优点。聚合物基复合材料与传统材料在比强度和比模量方面的比较如图 1-3 所示。

用于复合材料的聚合物基体有多种分类方法,如按树脂热行为可分为热固性及热塑性两类。热塑性基体如聚丙烯、聚酰胺、聚碳酸酯、聚醚砜、聚醚醚酮等,它们是一类线形或有支链的固态高分子,可溶可熔、可反复加工成型而无任

何化学变化；热固性基体如环氧树脂、酚醛树脂、不饱和聚酯、双马树脂等，它们在制成复合材料制品前，通常为相对分子质量较小的液态或固态预聚体，经加热或加固化剂发生化学反应固化后，形成不溶不熔的三维网状高分子。

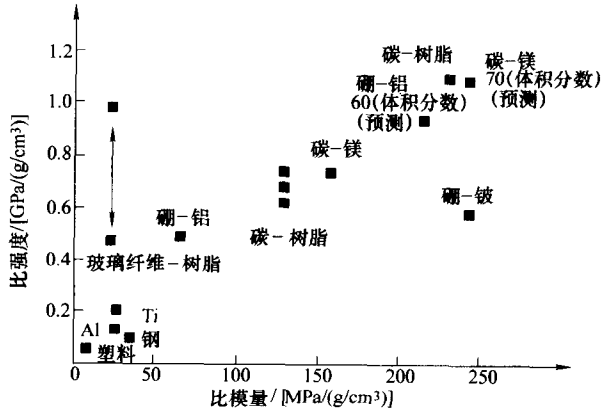


图 1-3 各种材料的比强度与比模量

传统的聚合物基体是热固性的，其最大的优点是具有良好的工艺性。由于固化前热固性树脂粘度很低，因而宜于在常温常压下浸渍纤维，并在较低的温度和压力下固化成型；固化后具有良好的耐药品性和抗蠕变性，缺点是预浸料需低温冷藏且贮存期有限，成型周期长和材料韧性差。热固性基体（主要是不饱和聚酯树脂、环氧树脂、酚醛树脂）一直在连续纤维增强树脂基复合材料中占统治地位，不饱和聚酯树脂、酚醛树脂主要用于玻璃增强塑料，其中聚酯树脂用量最大，约占总量的 80%，而环氧树脂则一般用作耐腐蚀性或先进复合材料基体。

热塑性基体的最重要优点是其高断裂韧性（高断裂应变和高冲击强度），这使得复合材料具有更高的断裂能。此外，热塑性树脂基体复合材料还具有预浸料不需冷藏且贮存期无限、成型周期短、可再成型、易于修补、废品及边角料可再生利用等优点。然而，热塑性基体的应用也因多方面原因而受到一定限制。首先是热塑性基体的熔体或溶液粘度很高，纤维浸渍困难，预浸料制备及制品成型需要在高温高压下进行，此外像聚碳酸酯或尼龙这样一些工程塑料，因耐热性、抗蠕变性或耐药品性等方面问题而使应用受到限制。目前，像聚醚醚酮（PEEK）、聚苯硫醚（PPS）、聚醚砜（PES）、热塑性聚酰亚胺（PAI）等高性能热塑性基体正在用于高性能复合材料结构，而以聚丙烯等为基体的玻璃毡增强热塑性复合材料（GMT）正在迅速发展以满足汽车等领域的需要。

按树脂特性及用途分为：通用树脂基体和高性能树脂基体。其中通用树脂基体又可按其使用功能分为一般用途树脂、耐热性树脂、耐候性树脂、阻燃树脂