

普通高等教育“十三五”规划教材

复合材料

FUHE CAILIAO

肖力光 赵洪凯 主编 汪丽梅 李 敏 副主编



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

复合材料

肖力光 赵洪凯 主编

汪丽梅 李敏 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《复合材料》详细阐述聚合物基复合材料、金属基复合材料、无机非金属基复合材料以及其他复合材料的界面及复合原理,各种力学性质以及其他性能,产品设计方法,制造工艺及应用情况,同时介绍了复合材料的分析测试方法以及相关实验。让学生在学习知识的同时培养创新精神,提高能力,增强素质,为进一步学习打下必要的基础。本书可作为材料化学、材料科学与工程、复合材料、高分子材料、无机非金属材料、应用化学等专业的本科生教材以及相关专业研究生的参考教材,还可作为从事材料科学与工程、复合材料、高分子材料、无机非金属材料、材料化学、建筑材料、建筑设计、机械设计等相关专业研究、开发、教学、生产、销售、投资人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料/肖力光,赵洪凯主编. —北京:化学工业出版社,2016.6
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-122-24876-3

I. ①复… II. ①肖…②赵… III. ①复合材料-高等学校-教材 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 185678 号

责任编辑:满悦芝
责任校对:边涛

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张21 $\frac{3}{4}$ 字数537千字 2016年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00 元

版权所有 违者必究

材料是人类赖以生存的物质基础，是人类物质文明的标志。材料的发展将人类社会文明推向更高的层次。科技对材料提出的更高要求带动了材料向复合化发展，从而诞生了第四大类材料——复合材料。复合材料具有轻质、高强、防腐、耐水、隔热及电绝缘等优异性能，被公认是除了金属材料、无机非金属材料、高分子材料之后的最有发展前景的一大类材料，已发展成为 21 世纪的主要工程材料。复合材料的崛起与发展极大地丰富了现代材料家族，为人类社会的发展开辟了无限的想象与实现空间，也为材料科学与工程持续发展注入了强大的生机与活力。

面对新材料、新工艺的不断涌现，复合材料呈现出低成本、高性能、功能化、结构功能一体化和智能化的发展趋势；同时复合材料新标准、新规范也不断地更新。笔者针对于此编写的《复合材料》教材是一本比较全面介绍重点应用于结构工程的相关聚合物基、金属基、无机非金属基复合材料方面的教材，其阐述复合材料中重要的基体、增强体以及改性组分，详细阐述聚合物基复合材料、金属基复合材料、无机非金属基复合材料以及其他复合材料的界面及复合原理，各种力学性质以及其他性能，产品设计方法、制造工艺及应用情况，同时介绍复合材料的分析测试方法以及相关实验。

结合材料类专业背景及相关专业实际需要，《复合材料》教材更加彰显专业特色，教材基于系统化设计教学内容及结构，重点介绍材料的组成、特点、工艺、表征及具体应用，为学生学好后续专业课及在日后的工作中做到正确、合理使用材料奠定坚实的基础。教材内容安排上由浅入深、通俗易懂，突出了基础性和可操作性。根据要讲授的内容，将理论学习与实践环节有效统一，突出实用性，以便完成课程的教学目标。根据新材料、新技术和新规范的发展，结合高校学科专业的特点，本教材中全部采用了复合材料生产过程中的新规范、新标准，教学内容充分展现了先进性，使该课程能够反映本学科领域的最新科技成果，并能和本领域的社会经济发展需要相结合。

《复合材料》一书力求让学生在在学习知识的同时培养创新精神，提高能力，增强素质，为进一步学习打下必要的基础。本书可作为材料化学、材料科学与工程、复合材料、高分子材料、无机非金属材料、应用化学等专业的本科生教材以及相关专业研究生的参考教材，还可作为从事材料科学与工程、复合材料、高分子材料、无机非金属材料、材料化学、建筑材料、建筑设计、机械设计等相关专业研究、开发、教学、生产、销售、投资的科研工作者、教师、工程设计人员、企业经营管理与技术人员的参考书。

本书结合了笔者多年从事教学、科研和校企合作的实践经验编写而成，共分为 9 章。内容包括绪论、复合材料的组成材料、复合材料的界面、复合材料设计原理、聚合物基复合材

料、金属基复合材料、水泥基复合材料、陶瓷基复合材料及复合材料实验。

本书由吉林建筑大学肖力光教授、赵洪凯教授主编，并由肖力光教授统稿。其中肖力光编写第7章；赵洪凯编写第4章、第5章、第8章的一部分、第9章；汪丽梅编写第3章、第6章、第8章的一部分；李敏编写第1章、第2章。

本书在编写过程中得到了同行以及多位老师的大力帮助，在此表示衷心的感谢。

由于本教材内容广泛，笔者水平所限，书中不完善之处在所难免，敬请同行和读者批评指正。

编 者

2016年5月

于吉林建筑大学

第1章 绪论

1.1 复合材料发展史	001
1.2 复合材料的定义	002
1.3 复合材料的命名和分类	002
1.4 复合材料的特点	004
1.4.1 聚合物基复合材料的主要性能	005
1.4.2 金属基复合材料的主要性能	006
1.4.3 陶瓷基复合材料的主要性能	007
1.4.4 水泥基复合材料的主要性能	008
1.5 复合材料的发展方向	008
1.5.1 发展功能、多功能、机敏、智能复合材料	008
1.5.2 仿生复合材料	009
1.5.3 纳米复合材料	010

第2章 复合材料的组成材料

2.1 增强材料	011
2.1.1 玻璃纤维	011
2.1.2 碳纤维	025
2.1.3 高模量有机纤维	030
2.1.4 其他增强纤维及材料	034
2.2 基体材料	037
2.2.1 聚合物基体	037
2.2.2 金属基体	054
2.2.3 无机非金属基体	059

第3章 复合材料的界面

3.1 界面和界面的形成	065
3.1.1 界面和界相	065
3.1.2 界面的形成机理	066
3.1.3 界面的作用	068
3.2 界面的微观结构	070
3.2.1 聚合物基复合材料	070

3.2.2 金属基复合材料	072
3.2.3 无机非金属基复合材料	076
3.3 复合材料界面的表征	077
3.3.1 复合材料界面微观力学分析	077
3.3.2 界面的成分分析	079
3.3.3 界面微观结构的表征	079
3.4 增强材料的表面处理及界面改性	079
3.4.1 化学偶联剂改性技术	080
3.4.2 电化学改进技术	081
3.4.3 等离子体处理技术	082
3.4.4 增强纤维的表面涂层技术	082

第 4 章 复合材料设计原理

4.1 复合材料的可设计性	084
4.1.1 复合材料的设计性	084
4.1.2 复合效应	085
4.2 材料的设计目标和设计类型	087
4.2.1 材料的使用性能和设计目标	087
4.2.2 复合材料的设计类型	087
4.3 复合材料设计的基本思想	088
4.3.1 复合材料的结构设计过程	088
4.3.2 复合材料的结构设计条件	089
4.3.3 材料设计	091
4.3.4 结构设计	094
4.3.5 复合材料的力学性能设计	097
4.3.6 复合材料其他物理性能的复合原理	098
4.3.7 复合材料的一体化设计	100

第 5 章 聚合物基复合材料

5.1 概述	102
5.2 聚合物基复合材料的性能及种类	104
5.2.1 聚合物基复合材料的性能	104
5.2.2 聚合物基复合材料的种类	108
5.3 热固性树脂基复合材料的制造技术	111
5.3.1 手糊成型工艺	111
5.3.2 模压成型工艺	120
5.3.3 缠绕成型工艺	128
5.3.4 喷射成型工艺	134
5.3.5 拉挤成型工艺	137

5.3.6	树脂传递模塑成型工艺	141
5.3.7	其他成型工艺	145
5.3.8	连接及胶接	149
5.4	热塑性聚合物基复合材料的制造技术	149
5.4.1	热塑性聚合物基复合材料预浸料制造技术	151
5.4.2	非连续纤维复合材料制造技术	154
5.4.3	连续纤维复合材料制造技术	158
5.5	聚合物基复合材料的应用	161

第6章 金属基复合材料

6.1	概述	167
6.1.1	金属基复合材料的分类	167
6.1.2	复合材料的研究历史及现状	168
6.1.3	金属基复合材料的研究趋势与展望	168
6.2	金属基复合材料的制备技术	170
6.2.1	固态制造技术	171
6.2.2	液态制造技术	173
6.2.3	原位自生成技术	176
6.2.4	复合材料的二次加工技术	177
6.3	金属基复合材料的性能	179
6.3.1	铝基复合材料	179
6.3.2	钛基复合材料	185
6.3.3	镍基复合材料	186
6.4	金属基复合材料的应用	187
6.4.1	航天与空间应用	187
6.4.2	航空及导弹等应用	188
6.4.3	在微电子系统中的应用	189
6.4.4	在其他领域的应用	189

第7章 水泥基复合材料

7.1	概述	191
7.1.1	纤维增强水泥基材料的概述	191
7.1.2	聚合物混凝土概述	196
7.2	水泥基体的种类及性能	197
7.2.1	硅酸盐水泥	197
7.2.2	掺混合材料的硅酸盐水泥	204
7.2.3	硫铝酸盐水泥	208
7.2.4	镁质胶凝材料	211
7.2.5	其他品种水泥	217

7.3 纤维增强水泥基复合材料	220
7.3.1 纤维在水泥基复合材料中的作用机理	220
7.3.2 玻璃纤维增强水泥基复合材料	224
7.3.3 钢纤维增强水泥基复合材料	230
7.3.4 其他纤维增强水泥基体复合材料	234
7.4 聚合物混凝土复合材料	235
7.4.1 聚合物混凝土复合材料的分类与特点	235
7.4.2 聚合物混凝土	235
7.4.3 聚合物浸渍混凝土	238
7.4.4 聚合物改性混凝土	240
7.5 水泥基复合材料的应用	242
7.5.1 玻璃纤维增强水泥基复合材料的应用	242
7.5.2 钢纤维混凝土的应用	244
7.5.3 聚合物混凝土的应用	246

第8章 陶瓷基复合材料

8.1 概述	252
8.1.1 连续纤维增强陶瓷基复合材料	252
8.1.2 短纤维、晶须增韧陶瓷基复合材料	253
8.1.3 颗粒增韧	254
8.2 陶瓷基复合材料的成型加工技术	255
8.2.1 简介	255
8.2.2 连续纤维增强陶瓷基复合材料的制备与加工	255
8.2.3 晶须或颗粒增强陶瓷基复合材料的制备与加工	259
8.3 陶瓷基复合材料的应用	259

第9章 复合材料实验

实验1 通用热固性树脂基本性能测试	261
实验1-1 环氧树脂的环氧值测定	261
实验1-2 不饱和聚酯树脂酸值测定	262
实验1-3 酚醛树脂凝胶、挥发分、树脂含量和固体含量测定	263
实验1-4 环氧树脂热固化制度的制定方法实验	264
实验1-5 树脂浇铸体制作及其巴科尔硬度测试	267
实验2 纤维、织物基本性能及纤维与稀树脂溶液的接触角测定	269
实验2-1 单丝强度和弹性模量测定	269
实验2-2 丝束(复丝)表观强度和表观模量测定	270
实验2-3 织物厚度、单位面积质量测定	271
实验2-4 纤维与稀树脂溶液的接触角测定	272
实验3 复合材料工艺方法试验	275

实验 3-1	手糊成型工艺试验	275
实验 3-2	复合材料模压工艺试验	277
实验 3-3	层压工艺试验	280
实验 3-4	热塑性塑料注射成型	282
实验 3-5	纤维缠绕工艺试验	284
实验 3-6	预浸料质量检验方法	288
实验 4	复合材料基本力学性能测试	293
实验 4-1	单向纤维复合材料实验样品制作	293
实验 4-2	单向纤维复合材料基本力学性能测定	299
实验 4-3	复合材料层压板拉伸试验	302
实验 4-4	复合材料层压板压缩试验	305
实验 4-5	复合材料层压板层间剪切试验	306
实验 4-6	复合材料弯曲试验	307
实验 4-7	复合材料简支梁式冲击韧性试验	309
实验 5	复合材料其他性能的测试	312
实验 5-1	树脂基体浇铸体马丁耐热和热变形温度测定	312
实验 5-2	复合材料电阻系数测定	315
实验 5-3	复合材料介电系数和介电损耗角正切测定	317
实验 5-4	复合材料热导率测定	320
实验 5-5	复合材料平均比热容测定	323
实验 5-6	纤维增强塑料燃烧性能试验方法——炽热棒法	326
实验 5-7	玻璃纤维增强塑料燃烧性能试验方法——氧指数法	328
实验 5-8	塑料燃烧性能试验方法——水平燃烧法	329
实验 5-9	复合材料加速老化试验	331
实验 5-10	复合材料耐腐蚀性试验	332
参考文献		336



第 1 章

绪 论



1.1 复合材料发展史

随着生活水平的提高,人们对材料性能的要求日益提高,单质材料已很难满足性能的综合要求和高指标要求,因此材料的复合化是材料发展的必然趋势之一。复合材料的出现是金属、陶瓷、高分子等单质材料发展和应用的必然结果,是各种单质材料研制和使用经验的综合,也是这些单质材料技术的升华。复合材料的兴起与发展极大地丰富了现代材料的家族,为人类社会的发展开辟了无限的想象和实现空间,也为材料科学与工程学的持续发展注入了强大的生机与活力。复合材料各组分之间“取长补短”、“协同作用”,极大地弥补了单一材料的缺点,产生了单一材料所不具有的新功能。复合材料的出现和发展,是现代科学技术不断进步的结果,也是材料设计方面的一个突破。它综合了各种材料如纤维、树脂、橡胶、金属、陶瓷等的优点,按需要设计、复合成为综合性能优异的新型材料。复合材料已广泛应用于航空航天、汽车、电子电气、建筑、体育器材、医疗器械等领域,近几年更是得到了突飞猛进的发展。可以预言,如果用材料来作为历史分期的依据,那么未来的 21 世纪,将是复合材料的时代。

复合材料是一种多相复合体系。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。但是人类在很早之前就开始使用复合材料。比如说,以天然树脂虫胶、沥青作为黏合剂制作层合板;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。混凝土的拉伸强度比较好,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拉伸强度及弯曲强度,这就是钢筋混凝土复合材料。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——玻璃钢出现,是现代复合材料发展的重要标志。玻璃纤维复合材料 1946 年开始应用于火箭发动机壳体,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。

20 世纪 60—70 年代,复合材料不仅可用玻璃纤维增强,还可新出现的纤维材料如硼纤维、碳纤维、碳化硅纤维、芳纶(kevlar)纤维增强,这使得复合材料的综合性能得到了

很大的提高,从而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,其复合材料的比强度不但超过了玻璃纤维复合材料,而且比模量是其5~8倍以上。这使结构的承压能力和承受动力负荷能力大大提高。碳/碳复合材料是载人宇宙飞船和多次往返太空飞行器的理想材料,用于制造宇宙飞行器的鼻锥部、机翼、尾翼前缘等承受高温载荷的部件。固体火箭发动机喷管的工作温度高达3000~3500℃,为了提高发动机效率,还要在推进剂中掺入固体粒子,因此固体火箭发动机喷管的工作环境是高温、化学腐蚀、固体粒子高速冲刷,目前只有碳/碳复合材料能承受这种工作环境。

20世纪70年代后期发展的用高强度、高模量的耐热纤维与金属复合,特别是与轻金属复合而成的金属基复合材料,克服了树脂基复合材料耐热性差和不导电、导热性低等不足。金属基复合材料由于金属基体的优良导电和导热性,加上纤维增强体不仅提高了材料的强度和模量,而且降低了密度。此外,这种材料还具有耐疲劳、耐磨耗、高阻尼、不吸潮、不胀气和膨胀系数低等特点,已经广泛用于航天航空等尖端技术领域,是理想的结构材料。

20世纪80年代开始逐渐发展陶瓷基复合材料,采用纤维补强陶瓷基体以提高韧性。主要目标是希望用以制造燃气涡轮叶片和其他耐热部件。

聚合物基、金属基、陶瓷基复合材料三类材料的耐热性能好、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,因此它们的开发与应用越来越受到人们的重视。

1.2 复合材料的定义

根据国际标准化组织(International Organizations for Standardization, ISO)对复合材料下的定义,复合材料是指由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料。复合材料可经设计,即通过对原材料的选择、各组分分布设计和工艺条件的保证等,使原组分材料优点互补,因而表现出了出色的综合性能。在复合材料中,通常有一相为连续相,称为基体;另一相为分散相,称为增强材料。分散相是以独立形态分布在连续相中的,两相之间存在着相界面。分散相可以是增强纤维,也可以是颗粒状或弥散的填料。

从上述定义中可以看出,复合材料可以是一个连续物理相与一个连续分散相的复合,也可以是两个或多个连续相与一个或多个分散相在连续相中复合,复合后的产物为固体时才称为复合材料,如复合产物为液体或气体时就不称为复合材料。复合材料既可以保持原材料的某些特点,又能发挥组合后的新特征,它可以根据需要进行设计,从而最合理地达到使用所要求的性能。

纵观复合材料的发展过程,可以看到,早期发展出现的复合材料,由于性能相对较低,生产量大,使用面广,可以称之为常用复合材料。后来随着高科技发展的需要,在此基础上又发展出性能高的先进复合材料。

1.3 复合材料的命名和分类

复合材料可根据增强材料与基体材料的名称来命名。将增强材料名称放在前面,基体材料的名称放在后面,然后加上“复合材料”。例如,玻璃纤维和聚氨酯构成的复合材料称为“玻璃纤维聚氨酯复合材料”。为书写简便,也可仅写增强材料和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”。如上述玻璃纤维与聚氨酯构成的复合材料,也可写做“玻璃/聚氨复合材料”。有时为了突出增强材料和基体材料,视强调的组分不同,也可简称为“玻璃纤维复合材料”或“聚氨酯复合材料”。碳纤维和金属基构成的复合材料叫“金属基复合材料”,也可写成“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”。

随着材料品种的增加,人们为了更好地研究和使用材料,需要对材料进行分类。材料的分类,历史上有许多方法。如按材料的化学组成分类,可分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料。按物理性质分类,有高温材料、磁性材料、透光材料、半导体材料、导电材料、超硬材料等。按用途分类有航空材料、电工材料、建筑材料、光学材料、生物材料、包装材料等。

复合材料的分类方法很多,常见的分类方法有以下几种。

(1) 按增强材料形态分类

① 连续纤维复合材料:作为分散相纤维,每根纤维的两个端点都位于复合材料的边界处;

② 短纤维复合材料:短纤维无规则地分散在基体材料中制成的复合材料;

③ 粒状填料复合材料:微小颗粒状增强材料分散在基体中制成的复合材料;

④ 编织复合材料:以平面二维或立体三维纤维编织物为增强材料与基体复合而成的复合材料。

(2) 按增强纤维种类分类

① 玻璃纤维复合材料;

② 碳纤维复合材料;

③ 有机纤维(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;

④ 金属纤维(如钨丝、不锈钢丝等)复合材料;

⑤ 陶瓷纤维(如氧化铝纤维、碳化硅纤维、硼纤维等)复合材料。

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复合材料(hybrid composite materials)。混杂复合材料可以看成是两种或多种单一纤维复合材料相互复合,即复合材料的“复合材料”。

(3) 按基体材料分

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,如铝基复合材料、钛基复合材料等;

③ 无机非金属基复合材料:以陶瓷材料(也包括玻璃和水泥)为基体制成的复合材料。

(4) 按增强体类型分类

① 颗粒增强型复合材料;

② 纤维增强型复合材料;

③ 板状复合材料。

(5) 按材料用途分类

① 结构复合材料:用于制造受力构件的复合材料。要求它质量轻、强度和刚度高、且能耐受一定温度,在某种情况下还要求有膨胀系数小、绝热性能好或耐介质腐蚀等其他

性能。

结构复合材料由增强体与基体组成。增强体承担结构使用中的各种载荷，基体则起到黏结增强体予以赋形并传递应力和增韧的作用。复合材料所用基体主要是有机聚合物，也有少量金属、陶瓷、水泥及碳（石墨）。结构复合材料通常按不同的基体来分类，如图 1-1 所示。在某些情况下也以增强体的形状来分类，这种分类适用于各种基体，见图 1-2。

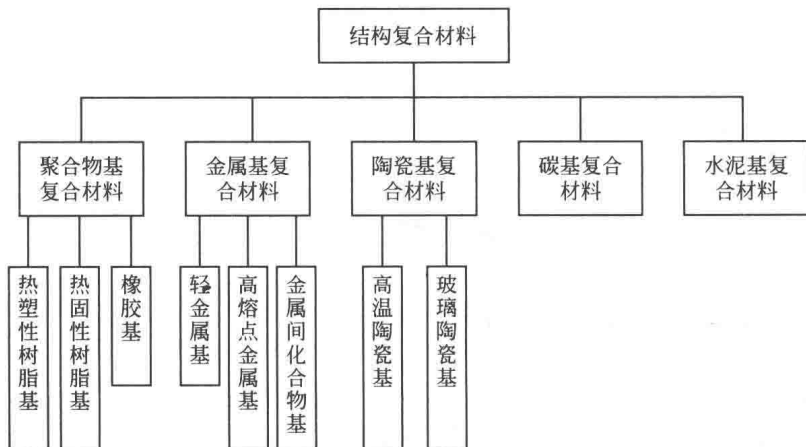


图 1-1 结构复合材料不同基体分类

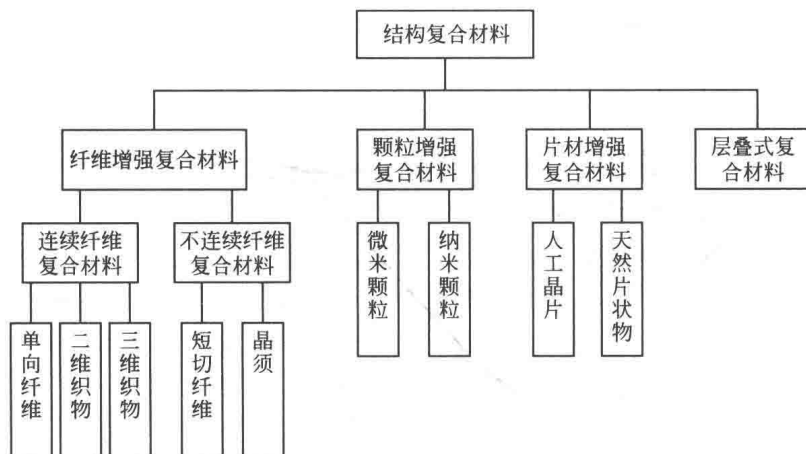


图 1-2 结构复合材料按不同增强体分类

② 功能复合材料：指除力学性能以外还具有各种特殊性能（如阻尼、导电、导磁、换能、摩擦、屏蔽等）的复合材料，是由功能体（提供物理性能的基本组成单元）和基体组成的。

此外，还有同质复合材料和异质复合材料。增强材料和基体材料属于同质物质复合材料为同质复合材料，如碳/碳复合材料。异质复合材料如前面提及的复合材料多属此类。

1.4 复合材料的特点

复合材料是由多相材料复合而成，其共同的特点如下。

① 可综合发挥各种组成材料的优点，使一种材料具有多种性能，具有天然材料所没有

的性能。例如，玻璃纤维增强环氧基复合材料，既具有类似钢材的强度，又具有塑料的介电性能和耐腐蚀性能。

② 可根据材料性能的需要对材料进行设计和制造。例如，针对方向性材料强度的设计，针对某种介质耐老化性能的设计等。

③ 可制成所需的任意形状的产品，可避免多次加工工序。例如，可避免金属产品的铸模、切削、磨光等工序。

性能的可设计性是复合材料的最大特点。影响复合材料性能的因素很多，主要取决于增强体材料的性能、含量及分布情况，基体材料的性能、含量及分布情况，以及它们之间的界面结合情况，作为产品还与成型工艺和结构设计有关。因此，不论对哪一类复合材料，就是同一类复合材料的性能也不是一个定值，在此只给出其主要性能。

1.4.1 聚合物基复合材料的主要性能

聚合物基复合材料是目前复合材料的主要品种，其产量远远超过其他基体复合材料。通常聚合物基体材料是指热固性聚合物与热塑性聚合物。综合归纳聚合物基复合材料有以下性能特点。

(1) 轻质、比强度和比模量大 普通碳钢的密度为 7.8g/cm^3 ，玻璃纤维树脂复合材料的密度为 $1.5\sim 2.0\text{g/cm}^3$ ，只有普通碳钢的 $1/5\sim 1/4$ ，比铝合金还要轻 $1/3$ 左右，而机械强度却能超过普通碳钢水平。按比强度计算（比强度是指强度与密度的比值），玻璃纤维增强树脂基复合材料不仅大大超过碳钢，而且可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小的密度和更高的强度，因此具有更高的比强度。几种材料的密度和比强度、比模量如表 1-1 所示。

表 1-1 几种材料的密度、比强度和比模量

材料	密度 /(g/cm^3)	拉伸强度 / 10^3MPa	弹性模量 / 10^5MPa	比强度 / 10^7cm	比模量 / 10^9cm
钢	7.8	1.03	2.1	0.13	0.27
铝合金	2.8	0.47	0.75	0.17	0.26
钛合金	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
碳纤维Ⅱ/环氧复合材料	1.45	1.50	1.4	1.03	0.97
碳纤维Ⅰ/环氧复合材料	1.6	1.07	2.4	0.67	1.5
有机纤维/环氧复合材料	1.4	1.4	0.8	1.0	0.57
硼纤维/环氧复合材料	2.1	1.38	2.1	0.66	1.0
硼纤维/铝复合材料	2.65	1.0	2.0	0.38	0.57

(2) 具有多种功能性 聚合物复合材料具有多种功能性，例如，耐烧蚀性好，聚合物基复合材料可制成具有较高比热容、熔融热和汽化热的材料，以吸收高温烧蚀的大量热；有良好的摩擦性能，包括良好的摩阻特性和减摩特性；高度的电绝缘性能；优良的耐腐蚀性能；特殊的光学、电学、磁学特性。

(3) 耐疲劳性好 金属材料的疲劳破坏常常是没有明显预兆的突发性破坏，而聚合物基

复合材料中纤维与基体的界面能阻止材料受力,使裂纹加深。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强度极限是其抗张强度的 20%~50%,而碳纤维/聚酯复合材料的疲劳强度极限可为其抗张强度的 70%~80%。

(4) 减振性好 受力结构的自振频率除与结构本身形状有关外,还与结构材料比模量的平方根成正比。复合材料的比模量高,因此其具有高的自振频率。同时,复合材料界面具有吸振能力,使材料的振动阻尼很高。例如,汽车减振系统轻合金梁需 9s 停止振动,而碳纤维复合材料需 2.5s 停止同样大小的振动。

(5) 过载时安全性好 复合材料中有大量的增强纤维,当材料过载而有少数纤维断裂时,载荷会重新分配到未破坏的纤维上,使整个构件在短期不至于失去承载能力。

(6) 有很好的加工性能 复合材料可采用手糊成型、模压成型、缠绕成型、注射成型和拉挤成型等各种方法制成各种形状的产品。

但是聚合物基复合材料还存在一定的缺点,如耐高温、耐老化性、抗冲击性和材料强度一致性等有待于进一步提高。

1.4.2 金属基复合材料的主要性能

金属基复合材料的性能取决于所选用的金属或合金基体和增强物的特性、含量、分布,以及基体与增强体相容性等。通过优化组合可以获得既具有金属特性,又具有高比强度、高比模量、耐热、耐磨等的综合性能。综合归纳金属基复合材料具有以下性能特点。

(1) 高比强度、高比模量 由于在金属基体中加入了适量的高强度、高模量、低密度的纤维、晶须、颗粒等增强物,明显提高了复合材料的比强度和比模量,特别是高性能连续纤维——硼纤维、碳(石墨)纤维、碳化硅纤维等增强物,具有很高的强度和模量。密度只有 1.85g/cm^3 的碳纤维的最高强度可达到 7000MPa ,比铝合金强度高出 10 倍以上,石墨纤维的最高模量可达 91GPa 。硼纤维、碳化硅纤维密度为 $2.5\sim 3.4\text{g/cm}^3$,强度为 $3000\sim 4000\text{MPa}$,模量为 $350\sim 450\text{GPa}$ 。加入 30%~50% 高性能纤维作为复合材料的主要承载体,复合材料的比强度、比模量成倍地高于基体合金的比强度和比模量。

(2) 导电、导热性能 金属基复合材料中金属基体占有很高的体积百分比,一般在 60% 以上,因此仍保持金属所具有的良好导热性和导电性。良好的导热性可以有效地传热,减少构件受热后产生的温度梯度,迅速散热,这对尺寸稳定性要求高的构件和高集成度的电子器件尤为重要。良好的导电性可以防止飞行器构件产生静电聚集的问题。

在金属基复合材料中采用高导热性的增强物还可以进一步提高金属基复合材料的热导率,使复合材料的热导率比纯金属基体还高。为了解决高集成度电子器件的散热问题,现已研究成功的超高模量石墨纤维、金刚石纤维、金刚石颗粒增强铝基、铜基复合材料的热导率比纯铝高、钢还高,用它们制成的集成电路地板和封装件可迅速有效地把热量散去,提高集成电路的可靠性。

(3) 热膨胀系数小、尺寸稳定性好 金属基复合材料中所用的增强物碳纤维、碳化硅纤维、晶须、颗粒、硼纤维等均具有很小的热膨胀系数,又具有很高的模量,特别是高模量、超高模量的石墨纤维具有负的热膨胀系数。加入相当含量的增强物不仅可以大幅度地提高材料的强度和模量,也可以使其热膨胀系数明显下降,并可通过调整增强物的含量获得不同的热膨胀系数,以满足各种工况要求。例如,石墨纤维增强镁基复合材料,当石墨纤维含量达

到48%时,复合材料的热膨胀系数为零,即在温度变化时使用这种复合材料做成的零件不发生热变形,这对人造卫星构件特别重要。

通过选择不同的基体金属和增强物,以一定的比例复合在一起,可得到导热性好、热膨胀系数小、尺寸稳定性好的金属基复合材料。

(4) 良好的高温性能 由于金属基体的高温性能比聚合物高很多,增强纤维、晶须、颗粒在高温下又都具有很高的高温强度和模量,因此金属基复合材料具有比金属基体更高的高温性能,特别是连续纤维增强金属基复合材料,在复合材料中纤维起着主要承载作用,纤维强度在高温下基本不下降,纤维增强金属基复合材料的高温性能可保持到接近金属熔点,并比金属基体的高温性能高很多。如钨丝增强耐热合金,其1100℃、100h高温持久强度为207MPa,而基体合金的高温持久强度只有48MPa;又如石墨纤维增强铝基复合材料在500℃高温下,仍具有600MPa的高温强度,而铝基体在300℃强度已下降到100MPa以下。因此,金属基复合材料被选用在发动机等高温零部件上,可大幅度地提高发动机的性能和效率。总之,金属基复合材料制成的零构件比金属材料、聚合物基复合材料制成的零构件能在更高的温度条件下使用。

(5) 耐磨性好 金属基复合材料,尤其是陶瓷纤维、晶须、颗粒增强金属基复合材料具有很好的耐磨性。这是因为在基体金属中加入了大量的陶瓷增强物,特别是细小的陶瓷颗粒。陶瓷材料具有硬度高、耐磨、化学性能稳定的优点,用它们来增强金属不仅提高了材料强度和刚度,也提高了复合材料的硬度和耐磨性。SiC/Al复合材料的高耐磨性在汽车、机械工业中有很广的应用前景,可用于汽车发动机、刹车盘、活塞等重要零件,能明显提高零件的性能和寿命。

(6) 良好的疲劳性能和断裂韧性 金属基复合材料的疲劳性能和断裂韧性取决于纤维等增强物与金属基体的界面结合状态,增强物在金属基体中的分布以及金属、增强物本身的特性,特别是界面状态。最佳的界面结合状态既可有效地传递载荷,又能阻止裂纹的扩展,提高材料的断裂韧性。据美国宇航公司报道,C/Al复合材料的疲劳强度与拉伸强度比为0.7左右。

(7) 不吸潮、不老化、气密性好 与聚合物相比,金属基性质稳定、组织致密,不存在老化、分解、吸潮等问题,也不会发生性能的自然退化,这比聚合物基复合材料优越,在空间使用不会分解出低分子物质污染仪器和环境,有明显的优越性。

总之,金属基复合材料所具有的高比强度、高比模量,良好的导热性、导电性、耐磨性、高温性能,低的热膨胀系数,高的尺寸稳定性等优异的综合性能,使金属基复合材料在航天、航空、电子、汽车、先进武器系统中均具有广泛的应用前景,对装备性能的提高将发挥巨大作用。

1.4.3 陶瓷基复合材料的主要性能

陶瓷材料强度高、硬度大、耐高温、抗氧化,高温下抗磨损性好,耐化学腐蚀性优良,热膨胀系数和相对密度较小,这些优异的性能是一般常用金属材料、高分子材料及其复合材料所不具备的。但陶瓷材料抗弯强度不高,断裂韧性低,限制了其作为结构材料使用。当用高强度、高模量的纤维或晶须增强后,其高温强度和韧性可大幅度提高。最近,欧洲动力公司推出的航天飞机高温区用碳纤维增强碳化硅基体和用碳化硅纤维增强碳化硅基体所制造的陶瓷基复合材料,可分别在1700℃和1200℃下保持20℃时的抗拉强度,并且有较好的抗压