

总主编 曹茂盛 李大勇 荆天辅

总主审 李庆芬 廖波 张宝生

# 材料科学与工程系列教材

根据 1998 年教育部颁布本科最新专业目录编写

王荣国 武卫莉 谷万里 主编

张显友 主审

# 复合材料概论

哈尔滨工业大学出版社



TB33

W35

材料科学与工程系列教材

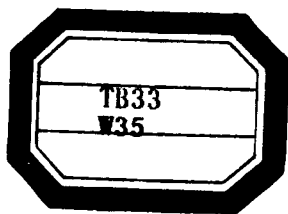
总主编 曹茂盛 李大勇 荆天辅

总主审 李庆芬 廖波 张宝生

# 复合材料概论

主编 王荣国 武卫莉 谷万里

主审 张显友



哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

## 内 容 提 要

本书全面系统地介绍了不同基体复合材料的原材料性能以及复合材料的性能、应用和成型工艺,同时对复合材料的结构设计、界面理论作了简单介绍。本书内容充实丰富,除作大学本科生、研究生教材外,还可作为从事复合材料研究与管理等工程技术人员的参考书。

## 材料科学与工程系列教材 总编审委员会

主任委员 曹茂盛  
副主任委员 张宝生 张显友 荆天辅  
委 员 (委员按姓氏笔画排序)  
邓启刚 王荣国 李大勇 李庆芬  
孙德智 谢辅洲 陈 平 杨尚林  
张德庆 姜兆华 赵 品 常铁军  
戴金辉 廖 波

材料科学与工程系列教材

### 复合材料概论

Fuhe Cailiao Gailun

主编 王荣国 武卫莉 谷万里

主审 张显友

\*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市工大节能印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/16 印张 17.25 字数 400 千字

1999年8月第1版 1999年8月第1次印刷

印数 1—3 000

ISBN 7-5603-1391-4/TG·52 定价 18.80 元

## 序 言

材料科学与工程系列教材是由哈尔滨工业大学出版社组织国内部分高校专家学者共同编写的一套大型系列教学丛书,被列为国家新闻出版署“九五”重点图书出版计划。编写本套丛书的基本指导思想是:总结已有、通向未来、面向 21 世纪,以优化教材链为宗旨,依照为培养材料科学人才提供一个捷径的原则,确定培养目标、编写大纲、书目及主干内容。为了确保图书品位、体现国家水平,编审委员会全体成员对国内外同类教材进行了长期细致的调查研究,广泛征求各参编院校第一线任课教师的意见,认真分析国家教育部新的学科专业目录和全国材料工程类专业教学指导委员会第一届全体会议的基本精神,进而制定了具体的编写大纲。经过全体编审人员的共同努力,现在这套教材即将出版发行,我们热切期望这套大型系列教学丛书能够满足国内高等院校材料工程类专业教育发展的需要,并且在教学实践中得以不断充实、完善和发展。

在本书的编写过程中,注意突出了以下几方面特色:

1. 根据科学技术发展的最新动态和我国高等学校学科归并的现实需求,坚持了加强基础、拓宽专业面、更新教材内容的基本原则。

2. 注重优化课程体系,探索教材新结构,即兼顾材料工程类学科中金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料共性与个性的结合,实现多学科知识的交叉与渗透。

3. 反映当代科学技术的新概念、新知识、新理论、新技术、新工艺,突出反映教材内容的现代化。

4. 坚持体现教材内容深广度适中,够用为原则,增强适用性。

5. 在系列教材编写过程中,进行了国内外同类教材对比研究,吸取了国内外同类教材的精华,重点反映新教材体系结构特色,把握教材的科学性、系统性和适用性。

此外,本套系列教材还兼顾了内容丰富、叙述深入浅出、简明扼要、重点突出等特色,能充分满足少学时教学的要求。

参加本套系列教学丛书编审工作的单位有:哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、燕山大学、哈尔滨建筑大学、哈尔滨理工大学和齐齐哈尔大学等六所院校 50 余名专家学者,他们为本套系列教材编审付出了大量的心血,在此,编审委员会对这些同志无私的奉献致以崇高的敬意。在本套系列教材编审的过程中,得到了全国材料工程类专业教学指导委员会主任吴林教授和哈尔滨工业大学材料科学与工程学院副院长方洪渊教授的指导,中国工程院雷廷权院士应邀出席了本套系列教材的终审讨论会,并就学科建设、课程建设及教材建设提出了许多宝贵意见。在此,一并表示衷心的感谢。

限于编审者的水平,疏漏和不妥之处在所难免,欢迎同行和读者指正。

材料科学与工程系列教材  
编审委员会  
1999 年元月

## 前 言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。20世纪70年代人们把信息、材料、能源作为社会文明的支柱;80年代以高技术群为代表的新技术革命,又把新材料与信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。这主要是因为材料是国民经济建设、国防建设与人民生活所不可须臾缺少的重要组成部分。复合材料作为材料科学中一支独立的新的科学分支,已得到广泛重视,正日益发展,并在许多工业部门得到广泛应用,成为当今高科技发展中新材料开发的一个重要方面。

本书是根据国家教育部1998年调整的最新专业目录,为适应加强基础、拓宽专业面的需要编写的。详细介绍了各种基体复合材料的种类、基本性能、成型加工技术及应用,同时为使读者对复合材料有较全面的了解,书中又安排了复合材料结构设计基础,复合材料的界面、复合材料的原材料等内容。使读者能够尽快掌握复合材料的全面知识。

本书具有以下特点:

1. 内容全面,涉及面广,剪系统性强。内容简明扼要,适合于宽口径、少学时的教学需要。
2. 本书内容与生产实际相结合,理论联系实际,充分介绍了新工艺、新产品,具有较强的适用性。
3. 书中文字简练、条理清楚、信息量大、易学易懂。

全书共分10章。第1~4章,第5章的5.1、5.2、5.3节由哈尔滨建筑大学王荣国编写,5.4由哈尔滨建筑大学吕敏编写;第6、7章由哈尔滨工程大学谷万里编写,第8~10章由齐齐哈尔大学武卫莉编写。全书由王荣国统稿,由哈尔滨理工大学张显友主审。

本书在编写过程中,参考和引用了一些文献和资料的有关内容,并得到了哈尔滨工业大学出版社材料科学与工程系列教材编审委员会的大力指导,得到了哈尔滨工业大学、燕山大学、哈尔滨工程大学、哈尔滨建筑大学、哈尔滨理工大学等院校的大力支持与协作,谨此一并致谢。

由于编者水平有限,书中定有不足之处,恳请同行和读者批评指正。

编 者

1999年7月

来信请寄哈尔滨工业大学出版社 张秀华(收)

地址:哈尔滨市南岗区教化街21号

邮编:150001

# 目 录

<b>第一章 总论</b> .....	1
1.1 复合材料的发展概况 .....	1
1.2 复合材料的命名和分类 .....	2
1.3 复合材料的基本性能 .....	3
1.4 复合材料结构设计基础 .....	8
<b>第二章 复合材料的基体材料</b> .....	11
2.1 金属材料 .....	11
2.2 无机胶凝材料 .....	16
2.3 陶瓷材料 .....	19
2.4 聚合物材料 .....	20
<b>第三章 复合材料的增强材料</b> .....	35
3.1 玻璃纤维及其制品 .....	35
3.2 碳纤维 .....	50
3.3 芳纶纤维(有机纤维) .....	54
3.4 其他纤维 .....	57
<b>第四章 复合材料的界面</b> .....	61
4.1 概述 .....	61
4.2 复合材料的界面 .....	62
4.3 增强材料的表面处理 .....	70
<b>第五章 聚合物基复合材料</b> .....	78
5.1 聚合物基复合材料的种类和性能 .....	78
5.2 聚合物基复合材料结构设计 .....	87
5.3 聚合物基复合材料成型加工技术 .....	102
5.4 聚合物基复合材料的应用 .....	118
<b>第六章 金属基复合材料</b> .....	124
6.1 金属基复合材料的种类和基本性能 .....	124
6.2 铝基复合材料 .....	131
6.3 镍基复合材料 .....	142
6.4 钛基复合材料 .....	145
6.5 石墨纤维增强金属基复合材料 .....	149
<b>第七章 陶瓷基复合材料</b> .....	154
7.1 陶瓷基复合材料的种类及基本性能 .....	154

7.2	陶瓷基复合材料的成型加工技术 .....	168
7.3	陶瓷基复合材料的应用 .....	173
<b>第八章</b>	<b>水泥基复合材料</b> .....	<b>174</b>
8.1	水泥基复合材料的种类及基本性能 .....	174
8.2	水泥基复合材料的成型工艺 .....	185
8.3	水泥基复合材料的应用 .....	199
<b>第九章</b>	<b>碳/碳复合材料</b> .....	<b>210</b>
9.1	碳/碳复合材料的发展 .....	210
9.2	碳/碳复合材料的成型加工技术 .....	211
9.3	碳/碳复合材料的应用 .....	224
<b>第十章</b>	<b>混杂纤维复合材料</b> .....	<b>234</b>
10.1	混杂纤维复合材料的种类和基本性能 .....	234
10.2	混杂纤维复合材料的结构设计 .....	243
<b>参考文献</b>	.....	<b>268</b>

# 第一章 总 论

## 1.1 复合材料的发展概况

人类发展的历史证明,材料是社会进步的物质基础和先导,是人类进步的里程碑。纵观人类利用材料的历史,可以清楚地看到,每一种重要材料的发现和利用,都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平,给社会生产力和人类生活带来巨大的变化。当前以信息、生命和材料三大学科为基础的世界规模的新技术革命风涌兴起,它将人类的物质文明推向一个新阶段。在新型材料研究、开发和应用,在特种性能的充分发挥以及传统材料的改性等诸多方面,材料科学都肩负着重要的历史使命。近 30 年来,科学技术迅速发展,特别是尖端科学技术的突飞猛进,对材料性能提出越来越高、越来越严和越来越多的要求。在许多方面,传统的单一材料已不能满足实际需要。这些都促进了人们对材料的研究逐步摆脱过去单纯靠经验的摸索方法,而向着按预定性能设计新材料的研究方向发展。

根据国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)为复合材料所下的定义,复合材料是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。复合材料的组分材料虽然保持其相对独立性,但复合材料的性能却不是组分材料性能的简单加和,而是有着重要的改进。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。分散相是以独立的形态分布在整个连续相中的,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。

从上述的定义中可以得出,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,也可以是两个或者多个连续相与一个或多个分散相在连续相中的复合,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称为复合材料。复合材料即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要求的性能。

由于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,产生单一材料所不具有的新性能。复合材料(Composite material)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。可以预言,如果用材料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。

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,由于性能相对比较低,生产量大,使用面广,可称之为常用复合材料。后来随着高技术发展的需要,在此基础上又发展出性能高的先进复合材料。



20世纪40年代,玻璃纤维和合成树脂大量商品化生产以后,纤维复合材料发展成为具有工程意义的材料。同时相应地开展了与之有关的科研工作。至60年代,在技术上臻于成熟,在许多领域开始取代金属材料。

随着航天航空技术的发展,对结构材料要求比强度、比模量、韧性、耐热、抗环境能力和加工性能都好。针对不同需求,出现了高性能树脂基先进复合材料,标志在性能上区别于一般低性能的常用树脂基复合材料。以后又陆续出现金属基和陶瓷基先进复合材料。

对结构用先进复合材料,各技术发达国家均提出研制开发目标。如日本通商产业省制定的下一代材料工业基础发展计划(1981~1988),对复合材料提出的要求是:树脂基复合材料的耐热性不低于250℃,拉伸强度达到2.5GPa以上;金属基复合材料的耐热性不低于450℃,拉伸强度达到1.5GPa以上。

经过60年代末期使用,树脂基高性能复合材料已用于制造军用飞机的承力结构,近年来又逐步进入其他工业领域。其增强体纤维有碳纤维、芳纶,或两者混杂使用,树脂基主要是固化体系为120℃或170℃的环氧树脂,还有少量聚酰亚胺树脂,以适应耐热性高达250℃的要求。

70年代末期发展的用高强度、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。

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。

## 1.2 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”。例如,玻璃纤维和环氧树脂构成的复合材料称为“玻璃纤维环氧树脂复合材料”。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”。如上述玻璃纤维和环氧树脂构成的复合材料,也可写做“玻璃/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“玻璃纤维复合材料”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“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”。

随着材料品种不断增加,人们为了更好地研究和使用的材料,需要对材料进行分类。材料的分类,历史上有许多方法。如按材料的化学性质分类,有金属材料、非金属材料之分。按物理性质分类,有绝缘材料、磁性材料、透光材料、半导体材料、导电材料等。按用途分类,有航空材料、电工材料、建筑材料、包装材料等。

复合材料的分类方法也很多,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:作为分散相的纤维,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的相互复合,即复合材料的“复合材料”。

## 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、换能、摩擦、屏蔽等)的复合材料。

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种物质的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。

# 1.3 复合材料的基本性能

复合材料是由多相材料复合而成,其共同的特点是:

(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)可按对材料性能的需要进行材料的设计和制造。例如,针对方向性材料强度的设计,针对某种介质耐腐蚀性能的设计等。

(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

于增强材料的性能、含量及分布状况,基体材料的性能、含量,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,在此只给出主要性能。

### 1.3.1 聚合物基复合材料的主要性能

#### 1. 比强度、比模量大

玻璃纤维复合材料有较高的比强度、比模量,而碳纤维、硼纤维、有机纤维增强的聚合物基复合材料的比强度由表 1-1 所示,相当于钛合金的 3~5 倍,它们的比模量相当于金属的 4 倍之多,这种性能可由纤维排列的不同而在一定范围内变动。

表 1-1 各种材料的比强度和比模量

材 料	密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	抗张强度 (103MPa)	弹性模量 (105MPa)	比强度 (107cm)	比模量 (109cm)
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. 耐疲劳性能好

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所致裂纹的扩展。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%。

#### 3. 减震性好

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。复合材料比模量高,故具有高的自振频率。同时,复合材料界面具有吸振能力,使材料的振动阻尼很高。由试验得知:轻合金梁需 9s 才能停止振动时,而碳纤维复合材料梁只需 2.5s 就会停止同样大小的振动。

#### 4. 过载时安全性好

复合材料中有大量增强纤维,当材料过载而有少数纤维断裂时,载荷会迅速重新分配到未破坏的纤维上,使整个构件在短期内不致于失去承载能力。

#### 5. 具有多种功能性

① 耐烧蚀性好。聚合物基复合材料可以制成具有较高比热、熔融热和气化热的材料,以吸收高温烧蚀时的大量热能;

- ② 有良好的摩擦性能,包括良好的摩阻特性及减摩特性;
- ③ 高度的电绝缘性能;
- ④ 优良的耐腐蚀性能;
- ⑤ 有特殊的光学、电学、磁学的特性。

### 6. 有很好的加工工艺性

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。

但是复合材料还存在着一些缺点,如耐高温性能、耐老化性能及材料强度一致性等有待于进一步研究提高。

### 1.3.2 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金属或合金基体和增强物的特性、含量、分布等。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  $1.85\text{g/cm}^3$  的碳纤维的最高强度可达到  $7000\text{MPa}$ ,比铝合金强度高出 10 倍以上,石墨纤维的最高模量可达  $91\text{GPa}$ ,硼纤维、碳化硅纤维密度为  $2.5 \sim 3.4\text{g/cm}^3$ ,强度为  $3000 \sim 4500\text{MPa}$ ,模量为  $350 \sim 450\text{GPa}$ 。加入  $30\% \sim 50\%$  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。图 1-1 所示为典型的金属基复合材料与基体合金性能的比较。

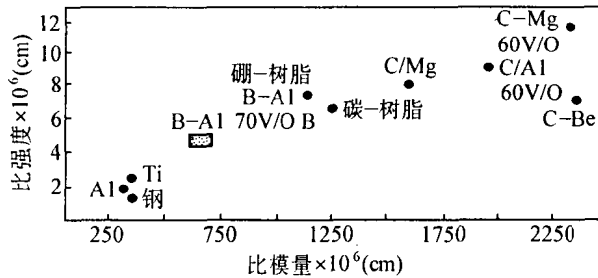


图 1-1 典型金属基复合材料与基体合金性能的比较

用高比强度、高比模量复合材料制成的构件重量轻、刚性好、强度高,是航天、航空技术领域中理想的结构材料。

#### 2. 导热、导电性能

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导热系数,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、铜基复合材料的导热率比纯铝、铜还高,用它们制成的集成电路底板和封装件可有效迅速地把热量散去,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。图 1-2 所示为一些典型金属基复合材料和金属材料的尺寸稳定性和比模量。可见石墨/镁复合材料具有最高的尺寸稳定性和最高的比模量。

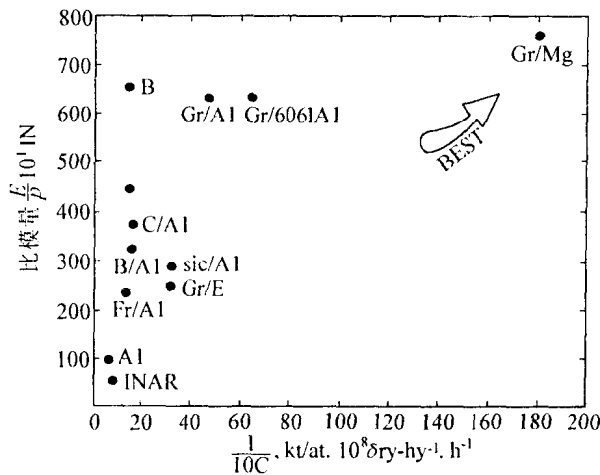


图 1-2 不同材料的尺寸稳定性和比模量

### 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许多。如钨丝增强耐热合金,其 1100℃,100 小时高温持久强度为 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的强度和刚度,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、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。

#### 1.3.3 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,热膨胀系数和比重较小,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,并且有较好的抗压性能,较高的层间剪切强度;而断裂延伸率较一般陶瓷高,耐辐射效率高,可有效地降低表面温度,有极好的抗氧化、抗开裂性能。陶瓷基复合材料与其它复合材料相比发展仍较缓慢,主要原因一方面是制备工艺复杂,另一方面是缺少耐高温的纤维。

#### 1.3.4 水泥基复合材料的主要性能

水泥混凝土制品在压缩强度、热能等方面具有优异的性能,但抗拉伸强度低,破坏前的许用应变小,通过用钢筋增强后,一直作为常用的建筑材料。但在钢筋混凝土制品中为了防止钢筋生锈,壁要加厚,重量也增大。而且钢筋混凝土的腐蚀一直是建筑业的一大难题。在水泥中引入高模量、高强度、轻质纤维或晶须增强混凝土,提高混凝土制品的抗拉

性能,降低混凝土制品的重量,提高耐腐蚀性能。

复合材料的性能是根据使用条件进行设计的。但是使用温度和材料硬度方面,三类复合材料有着明显的区别。如树脂基复合材料的使用温度一般为 $60\sim 250^{\circ}\text{C}$ ;金属基复合材料为 $400\sim 600^{\circ}\text{C}$ ;陶瓷基复合材料为 $1000\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 。复合材料的硬度主要取决于基体材料性能,一般硬度为陶瓷基复合材料大于金属基复合材料大于树脂基复合材料。

就力学性能而言,复合材料力学性能取决于增强材料的性能、含量和分布,取决于基体材料的性能和含量。它可以根据使用条件进行设计,从强度方面来讲,三类复合材料都可以获得较高的强度。

复合材料的耐自然老化性能,取决于基体材料性能和与增强材料的界面粘接。一般来讲其耐老化性能的优劣次序为:陶瓷基复合材料大于金属基复合材料大于树脂基复合材料。树脂基复合材料的耐自然老化性能也可以通过改进树脂配方、增加表面防护层等方法来提高和改善。

三类复合材料的导热性能和优劣比较为:金属基复合材料( $50\sim 65\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ );陶瓷基复合材料( $0.7\sim 3.5\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ );树脂基复合材料( $0.35\sim 0.45\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )。

复合材料的耐化学腐蚀性能是通过选择基体材料来实现。一般来讲陶瓷基复合材料和树脂基复合材料的耐化学腐蚀性能比金属基复合材料优越。在树脂基复合材料中不同的树脂基体,其耐化学腐蚀性能也不相同。聚乙烯酯树脂较通用型聚酯树脂有较高的耐化学腐蚀性,有碱纤维较无碱纤维的耐酸介质性能好。

从生产工艺的难易程度和成本高低方面分析,树脂基复合材料生产工艺成熟,产品成本最低;金属基复合材料次之;陶瓷基复合材料工艺最复杂,产品成本也最高。但无机粘接剂复合材料的成型工艺与树脂基复合材料相似,且产品成本大大低于树脂基复合材料。

## 1.4 复合材料结构设计基础

近几十年复合材料技术的发展为科学家和工程师开辟了新的领域。复合材料应用范围迅速扩大,特别是先进复合材料在高性能结构上的应用,大大促进了复合材料力学、复合材料结构力学的迅速发展,进一步增强了复合材料结构设计能力。

复合材料本身是非均质、各向异性材料,因此,复合材料力学在经典非均质各向异性弹性力学基础上得到迅速发展。近几十年复合材料的应用,实现了先进复合材料在高性能结构上,从进行次承力构件设计,到现在按照复合材料特点进行主承力构件设计。

复合材料不仅是材料,更确切地说是结构,可以用纤维增强的层合结构为例来说明这个问题。从固体力学角度,不妨将其分为三个“结构层次”:一次结构、二次结构、三次结构。所谓“一次结构”是指由基体和增强材料复合而成的单层材料,其力学性能决定于组分材料的力学性能、相几何(各相材料的形状、分布、含量)和界面区的性能;所谓“二次结构”是指由单层材料层合而成的层合体,其力学性能决定于单层材料的力学性能和铺层几何(各单层的厚度、铺设方向、铺层序列);“三次结构”是指通常所说的工程结构或产品结构,其力学性能决定于层合体的力学性能和结构几何。

复合材料力学是复合材料结构力学的基础,也是复合材料结构设计的基础。复合材

料力学主要是在单层板和层合板这两个结构层次上展开的,研究内容可以分为微观力学和宏观力学两大部分。微观力学主要研究纤维、基体组分性能与单向板性能的关系,宏观力学主要研究层合板的刚度与强度分析、温湿环境的影响等。

将单层复合材料作为结构来分析,必须承认材料的多相性,以研究各相材料之间的相互作用。这种研究方法称为“微观力学”方法。犹如在显微镜视野中分辨出了材料的微观非均质性,运用非均质力学的手段尽可能准确地描述各相中的真实应力场和应变场,以预测复合材料的宏观力学性能。微观力学总是在某些假定的基础上建立起分析模型以模拟复合材料,所以微观力学的分析结果必须用宏观试验来验证。微观力学因不能顾及不胜枚举的各种影响因素而总带有一定的局限性。但是,微观力学毕竟是在一次结构这个相对细微的层次上来分析复合材料的,所以它在解释机理,发掘材料本质,特别是在提出改进和正确使用复合材料的方案方面是十分重要的。

在研究单层复合材料时,也可以假定材料是均匀的,而将各相材料的影响仅仅作为复合材料的平均表现性能来考虑,这种研究方法称为“宏观力学”方法。在宏观力学中,应力、应变均定义在宏观尺度上,亦即定义在比各相特征尺寸大得多的尺度上。这样定义应力和应变称为宏观应力和宏观应变,它们既不是基体相的应力和应变,也不是增强相的应力和应变,而是在宏观尺度上的某种平均值。相应地,材料的各类参数也定义在宏观尺度上,这样定义的材料参数称为“表观参数”。在宏观力学中,各类材料参数只能靠宏观试验来获得。宏观力学方法较之微观力学方法显然粗糙得多。但是,由于宏观力学始终以试验结果作为根据,所以它的实用性和可靠性反而比微观力学强得多。因此,不能说宏观力学更好,或者说微观力学更好,事实上,它们是互相补充的。

将层合复合材料作为结构来分析,必须承认材料在板厚度方向的非均质性,亦即承认层合板是由若干单层板所构成这一事实,由此发展起来的理论称为“层合理论”。该理论以单层复合材料的宏观性能作为依据,以非均质力学的手段来研究层合复合材料的性能,它属于宏观力学范围。

工程结构的分析属于复合材料结构力学的范畴。目前复合材料结构力学以纤维增强复合材料层压结构为研究对象。复合材料结构力学的主要研究内容包括:层合板和层合壳结构的弯曲、屈曲与振动问题,以及耐久性、损伤容限、气动弹性剪裁、安全系数与许用值、验证试验和计算方法等问题。

复合材料设计也可分为三个层次:单层材料设计、铺层设计、结构设计。单层材料设计包括正确选择增强材料、基体材料及其配比,该层次决定单层板的性能;铺层设计包括对铺层材料的铺层方案做出合理安排,该层次决定层合板的性能;结构设计则最后确定产品结构的形状和尺寸。这三个设计层次互为前提、互相影响、互相依赖。因此,复合材料及其结构的设计打破了材料研究和结构研究的传统界限。设计人员必须把材料性能和结构性能一起考虑,换言之,材料设计和结构设计必须同时进行,并将它们统一在同一个设计方案中。

从分析的角度而言,复合材料与惯用的均质各向同性材料的差别主要是它的各向异性和非均质性。这种差别是属于物理方面的。我们知道,各向同性材料,独立的弹性常数只有两个:弹性模量  $E$ 、泊松比  $\gamma$ (或剪切模量  $G$ )。对于各向异性材料,独立的弹性常数



增加了。譬如图 1-3(c) 所示的单层板, 在面内有两个材料主方向: 纤维方向(纵向  $L$ ) 和垂直纤维方向(横向  $T$ )。在  $L$ - $T$  坐标系中, 单层板独立的弹性常数有四个: 纵向弹性模量  $E_L$ 、横向弹性模量  $E_T$ 、纵横向泊松比(或横纵向泊松比)、纵横向剪切模量  $G_{LT}$ , 表现出明显的正交异性特点。在材料的非主方向坐标系中, 正应力会引起剪应变, 剪应力会引起线应变, 这种现象称为交叉效应, 这是各向同性材料所没有的。对于各向同性材料, 强度与方向无关, 但是对于各向异性材料, 强度随方向不同而异。上述单层板在其面内就有五个基本强度: 纵向拉伸强度  $F_{Lt}$ 、纵向压缩强度  $F_{Lc}$ 、横向拉伸强度  $F_{Tt}$ 、横向压缩强度  $F_{Tc}$ 、纵横向剪切强度  $F_{LT}$ 。其它物理-力学性能也是各向异性的, 比如热性能, 单层板的纵向热膨胀系数  $\alpha_L$  和横向热膨胀系数  $\alpha_T$  也是不同的。总之, 单层板的各类参数都是方向的函数。在复合材料力学中, 各类参数的坐标转换关系经常会遇到, 因此, 熟悉它们并能熟练地运用它们是十分重要的。层合板厚度方向的非均质性会造成层合结构的一个特有现象: 耦合效应。所谓耦合效应, 是在小变形情况下, 面内内力会引起平面变形, 内力矩也会引起面内变形。如何避免或者利用藕合效应, 也是一个重要课题。复合材料结构设计是以复合材料力学分析理论和结构分析理论为基础的, 三者有机统一, 不可分割。

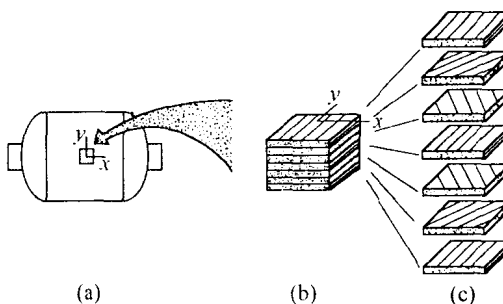


图 1-3