

复 | 合 | 材 | 料

Composite Materials

Case study

常启兵
编著

案例式

复合材料概述

金属基复合材料

聚合物基复合材料

陶瓷基复合材料

复合材料的界面及其作用

复 | 合 | 材 | 料

Composite Materials

Case study

常启兵
编著

案例式

复合材料概述

金属基复合材料

聚合物基复合材料

陶瓷基复合材料

复合材料的界面及其作用

图书在版编目(CIP)数据

复合材料：案例式 / 常启兵编著. —南京：江苏
凤凰美术出版社，2018.9

ISBN 978-7-5580-5137-1

I. ①复… II. ①常… 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(2018)第 204320 号

责任编辑 王左佐
助理编辑 许逸灵
责任校对 刁海裕
封面设计 焦莽莽
责任监印 殷 莉

书 名 复合材料：案例式
编 著 常启兵
出版发行 江苏凤凰美术出版社(南京市中央路 165 号 邮编:210009)
出版社网址 <http://www.jsmscbs.com.cn>
制 版 江苏凤凰制版有限公司
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 889 mm×1194 mm 1/16
印 张 18.5
字 数 435 千字
版 次 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷
标准书号 ISBN 978-7-5580-5137-1
定 价 58.00 元

营销部电话 025-68155790 营销部地址 南京市中央路 165 号
江苏凤凰美术出版社图书凡印装错误可向承印厂调换

前 言

复合材料是人们运用先进的材料制备技术将不同性质的材料组分优化组合而成的新材料,具有强度高、刚度大、质量轻,并具有抗疲劳、减振、耐高温、可设计等一系列优点。复合材料不仅保持各组分材料性能的优点,而且通过各组分性能的互补和关联可以获得单一组成材料所不能达到的综合性能。现代高科技的发展离不开复合材料,复合材料对现代科学技术的发展,有着十分重要的作用。复合材料的研究深度和应用广度及其生产发展的速度和规模,已成为衡量一个国家科学技术先进水平的重要标志之一。目前很多高校开设了复合材料科学与工程专业,复合材料成为其核心课程。然而,目前复合材料所涉及的知识面非常广,学生在掌握复合材料概念及性质时,往往会顾此失彼,为此,本教材通过列举复合材料的相关案例,以期学生能够通过具体案例,形成相关的感性认识,从而深入认识和把握复合材料的内涵。

本教材包含 5 章,第一章为复合材料概述,主要从复合材料的复合原则、可设计性、预测性、发展

性以及其应用等方面理解复合材料的内涵。第二章至第四章分别介绍金属基复合材料、聚合物基复合材料和陶瓷基复合材料,分别从基体和增强体等不同分类进行案例分析,供学生理解基体和增强体的匹配关系。在案例的选取上,注重涵盖该复合材料所涉及的种类以及最新的研究进展。第五章为复合材料的界面及其作用,对界面的界面作用、界面修饰、界面反应控制以及界面研究方法等进行举例,让学生理解复合材料界面对复合材料性能的决定性作用。

最后给出了部分参考文献,可供学生参考使用并追踪最新研究进展。限于篇幅,本书未将参考文献与书中内容一一对应,在此,恳请书中引述但未标注内容的作者予以谅解。

限于作者水平和经验,书中定有错误和欠缺之处,敬请读者批评指正。

编 者

2018 年 4 月

目 录

第1章

复合材料概述

1 复合材料的基本概念	2
1.1 复合材料的定义	2
1.2 复合材料定义的内涵	2
1.3 复合材料的分类	2
1.4 复合材料的命名	3
1.5 复合材料的特点	4
2 深入认识复合材料的案例	4
2.1 案例1——复合材料的复合原则	4
2.2 案例2——复合材料的设计性原则	6
2.3 案例3——复合材料的预测性原则	17
2.4 案例4——复合材料的发展性原则	25
2.5 案例5——复合材料的应用	35

第2章

金属基复合材料

1 金属基复合材料概况	48
1.1 概念	48
1.2 金属基复合材料的分类	48
1.3 金属基复合材料的性能特点	49
1.4 典型的金属基复合材料	50
1.5 制备方法	51
1.6 金属基复合材料发展趋势	54
2 深入认识金属基复合材料的案例	55
2.1 案例1——连续 SiC 纤维增强金属基复合材料	55
2.2 案例2——颗粒增强金属基复合材料	62
2.3 案例3——混杂增强金属基复合材料	67

2.4 案例4——石墨烯增强轻金属基复合材料	73
2.5 案例5——层状金属复合材料	75
2.6 案例6——梯度多孔金属基复合材料	79
2.7 案例7——铝基复合材料	82
2.8 案例8——镁基复合材料	88
2.9 案例9——铜基复合材料	95
2.10 案例10——金属基复合材料的构型强 韧化	99

第3章

聚合物基复合材料

1 聚合物基复合材料概述	106
1.1 定义和分类	106
1.2 聚合物基复合材料的发展过程	106
1.3 聚合物基复合材料的特点	107
1.4 聚合物基复合材料的基体	107
1.5 聚合物基复合材料中使用的纤维材料	110
2 深入认识聚合物基复合材料的案例	113
2.1 案例1——纤维增强热固性聚合物基复合材 料	113
2.2 案例2——晶须增强聚合物基复合材料	122
2.3 案例3——纳米氮化硅改性聚合物基复合材 料	127
2.4 案例4——石墨烯在聚合物基复合材料中的 应用	131
2.5 案例5——碳纳米管增强聚合物基复合材料	135

2.6 案例6——纳米粒子增强聚合物基复合材料力学性能	142
2.7 案例7——聚合物基复合材料摩擦学改性研究	148
2.8 案例8——聚合物基复合材料加速老化的研究方法	154
2.9 案例9——聚合物基复合材料的自修复	158

第4章

陶瓷基复合材料

1 陶瓷基复合材料的种类和性能	164
1.1 陶瓷基复合材料的种类	164
1.2 陶瓷基复合材料的设计原则	165
1.3 陶瓷基复合材料的制备工艺	166
1.4 陶瓷基复合材料制造与加工方法	171
2 深入认识陶瓷基复合材料的案例	172
2.1 案例1——连续碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料	172
2.2 案例2——晶须增强陶瓷基复合材料	177
2.3 案例3——颗粒形状对陶瓷基复合材料有效力学性能的影响分析	182
2.4 案例4——碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料	187
2.5 案例5——石墨烯/陶瓷基复合材料	192
2.6 案例6——氧化物/氧化物陶瓷基复合材料	199
2.7 案例7—— Al_2O_3 基陶瓷材料增韧的研究	204
2.8 案例8—— $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{B}_4\text{C}$ 复相陶瓷制备及其韧化机理的研究	209
2.9 案例9—— Si_3N_4 基复合材料的研究与应用	214
2.10 案例10—— TiB_2 基陶瓷复合材料	216
2.11 案例11——自愈合碳化硅陶瓷基复合材料	219

2.12 案例12——金属间化合物/陶瓷基复合材料	224
---------------------------------	-----

第5章

复合材料的界面及其作用

1 复合材料界面的基本概念	230
1.1 复合材料界面的定义	230
1.2 复合材料界面的作用及机理	230
1.3 复合材料界面的结合类型	231
1.4 复合材料界面破坏机理	231
1.5 复合材料界面研究内容	233
2 深入认识复合材料界面的具体案例	233
2.1 案例1——金属基复合材料界面反应控制研究进展	233
2.2 案例2——碳纳米管增强Cu基和Al基复合材料界面改性	239
2.3 案例3——聚合物基复合材料界面作用的研究方法	245
2.4 案例4——聚合物复合材料界面技术的研究进展	252
2.5 案例5——纤维增强聚合物复合材料界面结构的研究	255
2.6 案例6——热塑性碳纤维复合材料界面研究	257
2.7 案例7——碳纳米管/聚合物复合材料界面结合性能的研究	260
2.8 案例8——玻纤/聚丙烯复合材料的界面改性研究	267
2.9 案例9——陶瓷基复合材料界面增韧机理及复合新技术	270
2.10 案例10——陶瓷基复合材料中氮化硼界面相研究	275
2.11 案例11——碳纳米管增强陶瓷材料机理研究	282
参考文献	287

第 1 章 复合材料概述

1 复合材料的基本概念

1.1 复合材料的定义

复合材料(Composite materials)是由两种或两种以上不同性质的材料,通过物理或化学原理结合在一起、组成具有新宏观性能的材料。按照上述定义,复合材料有三大要素:基体(Matrix)、增强体(Reinforcement)和两者之间的界面(Interface)。一般而言,复合材料结构中的连续相称之为基体,基体的作用是将增强材料黏结成固态整体,保护增强材料,传递荷载,阻止裂纹扩展,如聚酯树脂、乙烯基树脂等。而以独立形态分布于基体中的分散相,由于其具有显著增强材料性能的特点,故称之为增强体,如玻璃纤维、晶须等。复合材料的基体和增强体,通过界面作用将两者连接起来。

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。使各组分材料在性能上互相取长补短,产生协同效应,使复合材料的综合性能优于原任何一种组分材料而满足更多领域的需求。复合材料改善或克服了组成材料的弱点,使能按零件结构和受力情况并按预定的、合理的配套性能进行最佳设计,可创造单一材料不具备的双重或多重功能,或在不同时间或条件下发挥不同的功能。

复合材料的性能取决于组分材料的性质和各组分材料之间结合面的性能,也就是说,复合材料的优良性能仅仅靠优质的组分材料是远远不够的。在复合材料中,增强相和基体相之间还存在着明显的结合面。位于增强相和基体相之间并使两相彼此相连的、化学成分和力学性质与相邻两相有明显区别、能够在相邻两相间起传递载荷作用的区域,称为复合材料的界面(Interface)。

基体、增强体和界面的关系见图 1-1。

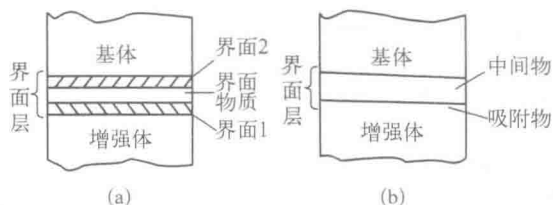


图 1-1 复合材料界面示意图 (a) 含界面物质; (b) 不含界面物质

1.2 复合材料定义的内涵

依据复合材料的定义,复合材料应不包括自然形成的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。复合材料具有以下特点:

- (1) 复合材料的组分和相对含量是由人工选择和设计的。
- (2) 复合材料是以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、独特的和可用的性能,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。

科学家把复合材料这种扬长避短的作用称为复合效应。人们利用复合效应可自由选择复合材料组成物质,人为设计各种新型复合材料,把材料科学推进到了一个新阶段。

1.3 复合材料的分类

复合材料的分类方法较多,具体如下:

1. 按增强材料的形态、几何形状及方向可分为 3 类:

(1) 颗粒状复合材料(Particulate Composites)

其增强体是由不同尺寸、形状的颗粒,随机散布在基体中,如图 1-2;由于增强体随机分布,此类复合材料可视为类均质(Quasi-Homogeneous)、类等向(Quasi-Isotropic)。颗粒复合材料的增强体可为金属或非金属,基材亦是。最具代表性者为混凝土,其中石子为增强体,水泥砂浆为基体。

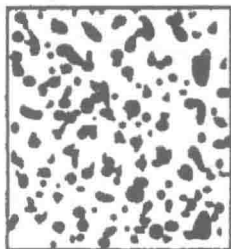


图 1-2 颗粒复合材料

(2) 不连续或短纤维复合材料(Continuous Or Short-Fiber Composites)

增强体为短纤维,方向可为单一方向,图1-3;或自由分布,如图1-4。前者为非等向性(Anisotropic),但具正交性(Orthotropic),后者可视为类等向性。

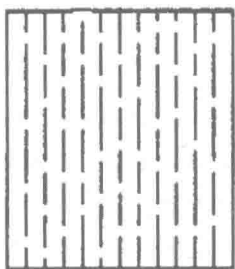


图1-3 不连续或短纤维复合材料(单一方向)



图1-4 不连续或短纤维复合材料(自由分布)

(3) 连续纤维复合材料(Continuous Fiber Composites)

增强体为连续长纤维,纤维方向可为单一方向(Unidirectional),如图1-5,或双向正交(Crossply),如图1-6,或多方向(Multidirectional),如图1-7;当纤维方向为单一或双向正交,该复合材料可视为具正交性,若排成多方向,则将复合材料视为类等向性。

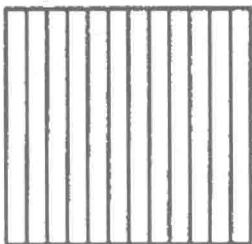


图1-5 连续纤维复合材料(单方向)

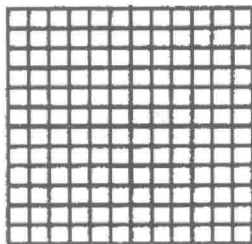


图1-6 连续纤维复合材料(双向正交)

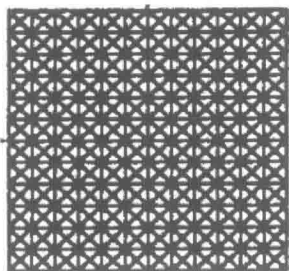


图1-7 连续纤维复合材料(多方向)

2. 按基体材料的种类可分为4类:

(1) 树脂基复合材料(Polymer Matrix Composites)

基体树脂包括环氧树脂(Epoxy)、酚醛树脂(Phenolic Resin)、乙烯基树脂(Vinyl Resin)、不饱和聚酯树脂(Unsaturated Polyester Resin)等热固性树脂(Thermosetting Resin)及热塑性树脂(Thermoplastics Resins),以不饱和聚酯树脂使用最多。增强材料多为玻璃纤维(Glass Fiber)及其织物、碳纤维(Carbon Fiber)或石墨(Graphite Fiber)及其织物、芳纶纤维(Aramid Fiber)及硼(Boron)纤维等。

(2) 金属基复合材料(Metal Matrix Composites)

金属基体包括铝(Aluminum)、镁(Magnesium)、钛(Titanium)及铜(Copper)等,增强材料则以硼、碳或石墨及陶瓷(Ceramic)为主。此类复合材料最高使用温度受金属基体本身熔化温度或熔点所限,约800℃。如连续或非连续硼纤维、碳纤维增强铝镁钛等金属基体。

(3) 陶瓷基复合材料(Ceramic Matrix Composites)

基体主要为陶瓷材料,包括碳化硅(Silicon Carbide)、氧化铝(Alumina)、玻璃陶瓷(Glass-Ceramic)及氮化硅(Silicon-Nitride),一般以陶瓷材料为增强材料,适合于相对高温使用,约1000℃。如碳纤维、碳化硅(SiC)晶须增强陶瓷。

(4) 碳基复合材料(Carbon Matrix Composites)

基体为碳或石墨,增强材料为石墨纤维及其织物(Fabric),此类复合材料具高强度,且在高温时具低密度及低热膨胀性,可适用于超高温约2600℃。如碳纤维增强碳基体(C/C复合材料)。

1.4 复合材料的命名

复合材料通常是根据基体材料和增强材料来命名,一般有以下几种情况:

(1) 根据基体材料来命名,强调基体时以基体材料的名字来命名,如树脂基复合材料、陶瓷基复合材料、金属基复合材料等。

(2) 根据增强材料来命名,强调增强材料时以增强材料的名字来命名,如玻璃纤维增强复合材料、碳纤维增强复合材料、陶瓷颗粒增强复合材料等。

(3) 基体材料的名称与增强材料的名称共用,此种命名方法一般用来表示某一具体的复合材料,习惯做法是增强材料的名称在前,基体材料的名称在后,如玻璃纤维/环氧树脂复合材料、碳纤维/金属基复合材料、碳/碳复合材料等。

在国外,通常用英文缩写来表示复合材料的名称,如 MMC(Metal Matrix Composites)表示金属基复合材料,FRP(Fiber Reinforced Plastics)表示纤维增强塑料,而玻璃纤维环氧材料则表示为 GF/Epoxy或 G/EP(G-EP)。

1.5 复合材料的特点

与传统材料相比,复合材料具有以下优点:

(1) 质量轻,比强度、比模量高

以碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastic, CFRP)为例:与钢相比,比重仅为钢的 1/5,强度为钢的 8 倍,模量为 3.6 倍,疲劳强度为 2.7 倍,抗拉强度为 1.4 倍。因此,在航空、火箭、宇宙飞行器、高压容器以及在其他需要减轻自重的制品应用中,都具有卓越成效。某些环氧 FRP 的拉伸、弯曲和压缩强度均能达到 400 MPa 以上。

(2) 耐疲劳性能好

复合材料比金属材料有较高的耐疲劳特性。通常金属材料的疲劳强度极限是其拉伸强度的 30%~50%,而碳纤维增强聚合物基复合材料的疲劳强度极限为其拉伸强度的 70%~80%。因此,用复合材料制备成在长期交变载荷条件下工作的构件,具有较长的使用寿命和较大的破损安全系数。

(3) 阻尼减震性好

受力结构的自振频率除与形状有关外,还同结

构材料的比模量平方根成正比,所以,复合材料具有较高的自振频率。同时复合材料的基体纤维界面具有较大的吸收震动能量,使材料的振动阻尼较高。

(4) 破损安全性高

复合材料的破坏不像传统材料那样突然发生,而是经历基体损伤、开裂、界面脱粘、纤维断裂等一系列过程。当少数增强材料发生断裂时,载荷又会通过基体的传递迅速分散到其他完好的纤维上去,从而延迟了灾难性破坏突然发生的时间。

(5) 可设计性强

复合材料的力学性能、机械性能及热、声、光、电性能等物理、化学性能都可以按照制品的使用要求和环境条件要求,通过组分材料的选择和匹配以及界面控制等材料设计手段,最大限度地达到预期的目的,以满足工程设备的使用性能。

(6) 材料与结构的同一性

复合材料尤其是纤维增强复合材料,与其说材料不如说是结构。复合材料构件与材料是同时形成的,它由组成复合材料的组分材料在复合成材料的同时也形成了构件。用此种方法成型的复合材料制品的整体性能好、可大幅度减少零部件和连接件数量,从而缩短加工周期,降低成本,提高构件的可靠性。

(7) 复合效应

复合材料的整体性能并不是其组分材料的性能的简单叠加或平均,其中涉及到复合效应。复合效应实际上是原相材料及其所形成的界面相互作用、相互依存、相互补充的结果。它表现为复合材料的性能在其组分基础上的线性或非线性的综合。复合效应有正有负。复合效应大致归为两类:混合效应和协同效应。

2 深入认识复合材料的案例

2.1 案例 1——复合材料的复合原则

若想制备一种好的复合材料,首先应根据所要求的性能进行设计。复合材料设计应遵循的原则

如下:

1. 材料组元的选择

在选择材料组元时,首先应明确各组元在使用中所应承担的功能,也就是说,必须明确对材料性能的要求。对材料组元进行复合,既可能要求复合后材料达到如下性能,如高强度、高刚度、高耐蚀、耐磨、耐热或导电、导热性能,也可能是要求某些综合性能,如既高强又耐蚀、耐热。所以必须根据复合材料所需的性能来选择组成复合材料的基体材料和增强材料。其次,除考虑性能要求外,还应考虑组成复合材料的各组元之间的相容性,这包括物理、化学、力学等性能的相容,使材料各组元彼此和谐地共同发挥作用。第三要考虑复合材料各组元之间的浸润性,使增强材料与基体之间形成比较理想的具有一定结合强度的界面。适当的界面强度不仅有利于提高材料的整体强度,更便于将基体所承受的载荷通过界面传递给增强材料,以充分发挥其增强作用。若结合强度太低,界面很难传递载荷,不能起增强材料的作用,影响复合材料的整体强度。但是结合强度太高也不利,它遏制复合材料断裂对能量的吸收,易发生脆性断裂。除此以外,材料设计还应联系整个复合材料的结构来考虑。具体而言:

纤维增强复合材料的复合原则是:

(1) 纤维增强相是主要承载体,应有高的强度和模量,且高于基体材料;

(2) 基体相起到黏结剂作用,应对纤维相具有润湿性,基体相应有一定的塑形和韧性;

(3) 两者结合强度应适当高;

(4) 基体与增强相的热膨胀系数不能相差过大;

(5) 纤维相必须具有合理的含量、尺寸和分布;

(6) 两者间不能发生有害的化学反应。

在颗粒复合材料中基体承受载荷,颗粒阻止分子链或位错的运动,其复合原则是:

(1) 颗粒相应高度均匀地弥散分布在基体中;

(2) 颗粒大小应适当;

(3) 颗粒的体积分数应在 20% 以上以达最佳强化效果;

(4) 颗粒与基体之间应具有一定的结合强度。

2. 制备方法的选择

材料组元选择后,就要考虑所采用的复合工艺路线,即具体的制备方法。制备方法的选择主要考虑以下四个方面:

(1) 所选的工艺方法对材料组元的损伤最小,尤其是纤维或晶须掺入基体之中时,一些机械混和方法往往造成纤维或晶须的损伤;

(2) 能使任何形式的增强材料(纤维、晶须、颗粒)均匀分布或按预设计要求规则排列;

(3) 使最终形成的复合材料在性能上达到充分发挥各组元的作用,即达到扬长避短,且各组元仍保留固有的特性;

(4) 在制备方法的选择上,还应考虑性能/价格比,在达到复合材料使用要求的前提下,尽可能选择简便易行的工艺以降低制备成本。

针对不同的增强材料和基体特性应采用不同的制备方法。如金属基复合材料中,采用纤维与颗粒、晶须增强时,同样采用固态法,但用纤维增强时,一般采用扩散结合;而用颗粒或晶须增强时,往往采用粉末冶金法结合。因为颗粒或晶须增强时,若采用扩散结合,势必使制造工艺十分复杂,且无法保证颗粒或晶须均匀分散。

例如,金属基复合材料增强颗粒的确定原则:

增强颗粒是金属基复合材料的重要组成部分,其作用是提高金属基体的强度、刚度、耐磨损等性能。一般确定原则是:

(1) 颗粒的硬度、刚度要高,用以增强复合材料的耐磨损耐冲击性能。材料的表面硬度 H_u 与磨料硬度 H_a 的比值应: $H_u/H_a > 0.8$ 。在磨料硬度未知的情况下,选用的复合材料硬度越高,其耐磨性越好,而复合材料的硬度和其中的陶瓷颗粒相

的硬度有很大关系。

(2) 增强颗粒与基体材料的高温润湿性应尽可能好一些,根据颗粒之间的毛细作用原理,润湿角越小,助渗深度越大,铁液的渗透能力越强,均越有利于形成结合致密、没有气孔和裂纹的优质复合材料。

(3) 增强颗粒应具有良好的化学稳定性,在复合材料的制备和使用过程中其组织结构和性能不发生明显的变化或退化,虽然允许增强颗粒与基体发生一定程度的界面化学反应,但要避免因严重的界面反应生成脆性相而影响复合材料的性能。

(4) 增强颗粒的粒度要适宜,太大或太小都有可能产生不利影响。颗粒粒度太大,影响铸件尺寸精度和表面光洁度;颗粒粒度太小,比表面积大会导致溶解严重而降低颗粒体积含量,并进一步削弱颗粒的增强效果。一般要求:增强颗粒不应当像结构件中的增强颗粒粒度那样细小(级别一般在 $\text{nm} \sim \mu\text{m}$),而是要比这一粒度大得多,一般在 $\mu\text{m} \sim \text{mm}$ 级。

2.2 案例 2——复合材料的设计性原则

2.2.1 复合材料的可设计性

复合材料的出现与发展为材料及结构设计者提供了前所未有的好时机。设计者可以根据外部环境的变化与要求来设计具有不同特性与性能的复合材料以满足工程实际对高性能复合材料及结构的要求。这种可设计的灵活性再加上复合材料优良的特性(高比强、高比模等)使复合材料在不同应用领域竞争中已成为特别受欢迎的候选材料。另一方面,复合材料的成本高于传统材料,这在一定意义上限制它的应用。因此,只有降低成本才可扩大它的应用,而材料的优化设计是降低成本的关键之一。

复合材料设计是将组分材料性能及复合材料微观结构同时考虑,其目的就是获得人们所期望的材料及结构特性。与传统材料设计不同,复合材料设计是一个复杂的设计问题,它涉及多个设计变量

的优化及多层次设计选择。复合材料设计问题要求确定增强物的几何特征(连续纤维、颗粒等)、基体材料、增强材料、增强物的微观结构以及增强物的体积分数。这样,对于给定的特性及性能规范,要想通过对上述设计变量进行系统的优化是一件比较复杂的事。

复合材料在弹性常数、热膨胀系数和材料强度等方面具有明显的各向异性性质。复合材料的各向异性,一方面使分析工作复杂化,但另一方面也给复合材料的设计提供了一个契机,可以根据不同方向上对材料刚度和强度的特殊要求来设计复合材料及结构,以满足工程实际中的特殊需要。复合材料的不均匀性也是其显著的特点。这种不均匀性对复合材料宏观刚度的影响并不太明显,然而对其强度的影响特别显著,其主要原因在于材料的强度过分依赖于局部特性。这一点在复合材料的设计中应特别注意。有些复合材料的拉压弹性模量及强度并不相同,且是非线性的。这在对复合材料进行分析时需首先判断材料内部的拉压特性,并结合不同的强度准则对其进行分析。此外,复合材料的几何非线性及物理非线性也是要特殊考虑的。复合材料的可设计性是它超过传统材料的最显著优点之一。由于复合材料具有不同层次上的宏观结构,如复合材料层合板中的纤维及纤维与基体的界面可视为微观结构,单层板可作为微观结构,而层合板作为宏观结构,因此可采用微观力学理论和/或数值分析手段对其进行设计。设计的复合材料可以在给定方向上具有所需要的刚度、强度及其他性能,而各向同性材料则不具有这样的可设计性。通常,在不是最大需要的方向上也具有过剩的强度和刚度。

设计复合材料及结构时,必须进行系统的实验工作,了解并掌握复合材料及结构在静载荷、动载荷、疲劳载荷及冲击载荷作用下,在不同使用环境(室温、高温、低温、湿热、辐射和腐蚀等)下的各种重要性能数据,建立不同材料体系性能的完整数据

库,为材料的设计工作提供科学依据。随着现代计算机技术的迅速发展,材料的设计和制造已可以在计算机上以虚拟的形式实现。其优点在于:①可节省大量的人力、物力和财力;②缩短设计和研制周期;③可考虑每一设计参数对复合材料及结构性能的影响;④在计算机上可对虚拟设计及制造的产品进行评价,优化设计方案和成型工艺方法及过程。

2.2.2 复合材料的设计性所面临的问题

复合材料设计是一个复杂的系统性问题,它涉及环境载荷、设计要求、材料选材、成型方法及工艺过程、力学分析、检验测试、维护与修补、安全性、可靠性及成本等诸多因素。通常,复合材料及结构的刚度和强度是设计中需求特殊考虑的两个重要因素。对于前一个问题,已有较成熟的理论和方法,而对于后一个问题,目前仍有许多悬而未决的疑难问题需要解决。除了材料的刚度和强度外,复合材料的制造工艺问题也应在设计时加以考虑。由于复合材料的成型工艺过程较复杂,影响材料性能的因素也很多,因此生产出来的产品质量不稳定,可靠性差。这些都给复合材料及结构的设计带来不少困难和问题,也影响了复合材料及结构的广泛应用。

复合材料的设计性所面临的问题:

(1) 工程结构设计原则由静态设计向动态设计过渡,在复合材料结构的设计中,许多问题都与结构的动态性能有关,因此应对复合材料结构进行动态分析。例如结构的动态力学性能分析、动态响应分析,以及各种自激振动的产生和控制等。

(2) 工程结构发生的力学、热学以及电磁学等现象往往是瞬态过程。因此,应以瞬态波动力学的观点去设计复合材料结构。结构的动态响应与其静态问题有着本质的差别。利用弹性动力学理论对瞬态动应力数值分析,可以发现结构的动应力集中系数与静应力集中系数不同。例如含圆形孔洞的弹性体动应力集中系数可达到静应力集中系数的1.15倍。

的1.15倍。

(3) 许多工程结构承受的载荷是随机性的,以及在机械设备的频繁启动中其承受的载荷是动态的。研究在交变动态载荷下,基于载荷谱设计一个安全可靠的结构是现代工程结构设计的特点。现代工业的发展,必须考虑交变载荷作用下的疲劳强度、寿命等问题。

(4) 由线性结构系统的设计转向非线性结构系统的设计,如薄壁板壳结构承载时的大位移、大变形等产生的几何非线性问题。

(5) 目前已从研究定型结构转向开发研制智能结构、自适应结构。加工对象由金属材料开始转向复合材料、功能材料、智能材料。

(6) 研究的对象由简单结构系统拓展到复杂系统,如流固耦合、气固耦合、机械运动与热学现象或电磁现象耦合系统等。

(7) 材料和结构强度分析要充分考虑复合材料的特殊性,不仅要考虑复杂应力状态,同时更要注意到材料的各向异性和非均匀性,以及从材料到结构的尺寸和形状变化对使用性能的影响,因此必须修正原有强度理论或探索新的理论。

(8) 力学与材料科学结合从宏观到微观的各个层次研究材料的力学性能,是现代力学发展的特点。要对结构疲劳损伤及高温蠕变损伤进行研究,需要用到损伤力学的知识,常规的做法是对材料做大量的宏观与微观定量实验观测,工作量很大。计算机的发展使得人们可以用数值模拟方法分析材料损伤演化过程,预测材料及结构的变形、破坏和使用寿命等。

2.2.3 复合材料设计的基本思想

一般来说,复合材料及结构设计大体上可分为以下步骤,如图1-8所示。

首先,确定复合材料及结构所承受的外部环境载荷,如机械载荷、热载荷、潮湿环境等。

第二步,根据所承受的环境载荷选择合适的组分材料,包括组分材料种类及几何特征,这部分工作是

基于人们对已有材料体系基本性能的了解和掌握。

第三步,是选择合适的制造方法及工艺条件,必要时需对工艺过程进行优化。

第四步,是利用微观力学理论或有限元分析方法或现代实验测量技术确定复合材料代表性单元的平均性能与组分材料及微观结构之间的定量关系,进而确定复合材料梁、板、壳等宏观结构的综合性能。

第五步,对应于所有外部环境载荷和各种设计参数变化范围,分析复合材料内部的响应,如变形及应力场、温度场、振动频率等。

最后,是复合材料及结构的损伤演化及破坏过程分析,主要是利用损伤力学、强度理论、断裂力学等手段。

上面这六部分是复合材料及结构设计中重要的基本步骤。

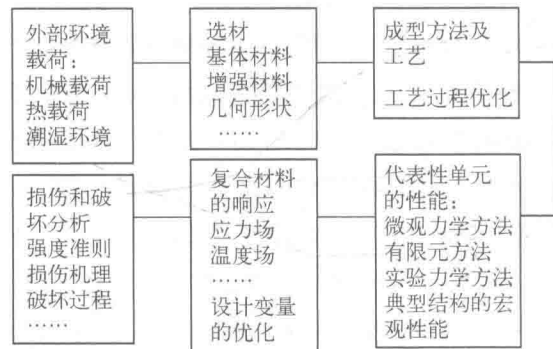


图 1-8 复合材料设计的基本步骤

1. 复合材料的设计条件

(1) 结构所提出的要求

为了使结构满足使用中所提出的要求,就必须确保结构能够有效地抵抗外部环境载荷的作用。对于在动载荷及反复加载情况下产生的结构疲劳以及在静载荷和变载荷作用下产生的蠕变,必须保证结构所应有的可靠性及寿命。除机械载荷外,在特殊环境条件下使用的结构,如浸泡在酸溶液中或在高温下使用的结构等,还必须保证它的耐久性。通常,复合材料结构的强度与刚度的要求是两个主要的方面,常常是并存的。

(2) 性能及结构重量

结构的性能与结构重量的比值是衡量材料优劣的一个重要指标。在运输机械和飞行器结构(如车辆、汽车、船舶、飞机、火箭等)中,若结构自身的重量轻,则运输及运载的效率就高,这一点在航空航天领域内就更显得重要。

(3) 环境载荷

一般在设计结构系统时,应该明确该结构所处的环境条件。通常的环境条件包括:① 机械条件——振动、冲击、噪声、加速度等;② 物理条件——压力、温度、湿度等;③ 气象条件——风雨、雷电、冰雪、日光等;④ 大气条件——放射线、盐雾、风沙等。上述条件既与结构的强度和刚度有关,同时也与材料的腐蚀、磨损、变质等有关。

(4) 可靠性、安全性、经济性

对于飞机、火箭或人造卫星等航空航天器,减轻结构重量,提高有效载荷是设计者追求的永恒主题,复合材料的高比强和高比模正适合这种要求。实际上,当它的结构重量每减少 1 千克时,其整体重量将减少数千克或更多。这个倍数称为增量系数,因此材料的选择和获得最大限度的安全性的方法对经济贡献很大。除了在航空航天领域的应用外,复合材料及结构已被成功地应用于船舶、汽车、建筑等行业中。对一个结构,可靠性和经济性必须同时考虑,此外还要考虑可修复性和可回收性。对于一些复合材料,如果在设计和工艺过程中进行优化,上述目标是可以达到的。

2. 复合材料的选材

选材会影响整个材料设计过程的每个部分。这是因为,一个真正的具有创造性的设计,不考虑所用的材料和制造方法是很难取得成功的。以前,材料设计的理论基础很不完善,而且还有许多未知的因素,设计者主要依靠前人的经验进行设计。由于计算机技术的迅速发展,在设计过程中就可以采用更为完善和合理的理论模型。可供设计者进行选择的材料种类很多,相应的性能范围也很广。在

实际应用中,复合材料中基本组分材料的选择应该遵循以下两条重要原则:① 材料的选择应该满足复合材料设计中所提出的要求;② 材料的选择应满足特定的规范。除了上述两条原则外,材料的成本问题也是选材过程中需要考虑的问题。为了便于比较成本,有时也将成本并到材料的性能参数中。例如,表达式 P_m/σ_{YS} 反映了承受拉伸载荷的零件的情况,其中 P_m 为单位重量的成本, σ_{YS} 为材料的屈服强度, ρ 为材料的密度。该式给出了单位长度棒材的成本,其截面足以承受单位载荷。说明

了复合材料的选材过程,以空间飞行器复合材料及结构的选材为例。对于飞行器用先进复合材料结构,关键的设计要求是结构具有高的比强度和比刚度。此外,还要考虑太空中的恶劣环境载荷,如热辐射、空气动力学载荷等。因此,在选择飞行器上使用的复合材料及结构时,必须认真仔细地评价材料设计要求,以保证飞行器结构具有优良的热防护及较高的结构强度和刚度。如表 1-1 所示,除了常规的力学性能外,还还包含其他一些性能,如热膨胀系数、比热容、激光硬化等。

表 1-1 材料选择特性及特征

静态特征	疲劳特征	断裂特征	热特征	制造方法	不利环境
纵向强度	常幅载荷	断裂韧度	热膨胀系数	工艺特征	潮湿
横向强度	变幅载荷	缺陷增长特征	热传导系数	连接技术	温度
剪切强度	载荷谱		比热容	无损检测方法	激光硬化
弹性模量				质量保证	核硬化
泊松比					

对于飞行器复合材料结构,选材的影响因素包括可提供的数据库、所需求的材料供应及低的材料成本。通常,一个完整的材料数据库将包括材料的设计、分析、工艺和力学性能。目前,对于材料数据库的一个重要影响因素是缺少由被测试试样所提供的必要“信息”。材料的质量及特性不仅与工艺条件有关,而且也与时间和一些不确定的因素有关。另一个重要选材因素是复合材料的成本。目前,高成本是限制先进复合材料大规模应用的一个主要障碍。随着原材料成本的降低及制造自动化程度的提高,先进复合材料的高成本问题将会得到解决。

3. 复合材料的材料/工艺/设计一体化设计

复合材料与传统材料相比有许多不同的特点,表现最明显的是性能的各向异性和可设计性。在传统材料的设计中,均质材料可以用少数几个性能参数表示,较少考虑材料的结构与制造工艺问题,

设计与材料具有一定意义上的相对独立性。但复合材料的性能往往与结构以及工艺有很强的依赖关系,可以根据设计的要求使受力方向具有很高的强度或刚度,是一种可设计的材料。因此在产品的设计同时,必须进行材料结构设计,并选择合适的工艺方法。材料、工艺、设计三者必须形成一个有机的整体,形成一体化。

传统的产品结构设计通常采用顺序的工程方法,产品设计人员不能有效地与工艺设计人员协同合作。因而在设计阶段不能及早地考虑制造工艺中的问题,造成设计与制造的脱节。结果设计出来的产品不能满足性能的要求,只好重新再设计,延长了周期,增加了成本。统计资料表明:在产品的设计阶段尽早考虑产品结构生命周期内所有的影响因素,建立完整统一的产品结构信息模型,将工艺、制造、材料、质量、维修等要求体现在早期设计中。通过设计中各个环节的密切配合,避免在制造

和使用过程中出现问题而引起不必要的返工。这样可以在较短的时间内,以较少的投资获得高质量的产品。例如,美国 GE 公司在为美海军研制 F414 发动机时,就采用了集成的设计制造一体化技术;在研制全新的单晶低压涡轮叶片时,使原来的研制周期从 44 周缩短为 22 周。普·惠公司(P&W)在研制美国先进战斗机(ATF)用的推重比为 10 的 F119-PW-100 新一代发动机时,采用了一体化产品研制技术,使性能、可靠性、维修性、可制造性及成本等多项指标都达到了最佳的效果。由此看来,在对现代复合材料结构进行设计时应充分考虑到制造过程中的诸多因素,同时也应对其性能进行适当的评价,以判明产品结构是否达到人们所期望的指标。复合材料的材料、设计、制造、评价一体化技术是未来的发展趋势,它可以有效地促进产品结构的高度集成化,并保证其产品的高效及高可靠性。

4. 复合材料及其结构的软设计

目前,软科学理论发展异常迅猛,已渗透到各个科学领域,出现了许多新学科,如工程软设计理论、结构软设计理论等。计算机模糊控制早已起步,据资料报道,日本、美国已经开始了机械设计软科学理论的研究。从这里可以看出软科学与各个学科结合、渗透的发展趋势。复合材料领域中,“软科学”这个名词还非常陌生。但近几年已经有专家、学者进行了复合材料可靠度方面的研究工作,并取得了很大成果。虽然他们并未意识到“可靠度”就是软科学理论的一个分支,但足以说明复合材料对软科学理论的需求。复合材料软科学理论虽然已经起步,但只是对个别问题的研究,还不完善。

复合材料及其结构软设计,就是利用软科学理论、手段,来进行复合材料设计。例如,复合材料最大拉应力准 $\sigma \leq 1\,000\text{ MPa}$ 则作为设计基准进行材料及结构设计时,有很大缺陷。首先, $\sigma = 999\text{ MPa}$ 与 $\sigma = 1\,001\text{ MPa}$ 无实质性差别。但根据准则,前者是允许的,而后者是不允许的。实际上,这里的

允许概念是相对的、模糊的,不是绝对的。把模糊集合人为地规定成有明确边界的普通集合,就造成了矛盾,这个矛盾只有用软科学手段才能解决。其次,材料及结构在使用过程中,会有很多随机性因素,确定性判据忽略这些随机性因素,不能说明结构在使用期间的可靠性。

在这种形式下,复合材料科学也将向软化方向发展。其原因在于:

(1) 软科学方法可以克服传统设计中的缺陷强度允许范围具有的模糊性和随机性。如果某一个次要构件的应力稍大于许用应力,只要总的方案可行,仍可采用。按以往的设计方法,尤其是计算机计算时,任何约束条件若被轻微破坏,整个方案即被否决。因此,有可能错过非常优秀的设计方案,甚至是最适用方案。这个矛盾只有用软科学手段来解决。

(2) 复合材料及其结构自身的不确定因素。一般来说,复合材料性能受以下诸方面的影响:组分材料的性能、增强物的尺寸、体积分数及分布、界面形态、成型工艺等。这些影响因素存在较大程度的未确知性、模糊性。此外,由于认识的局限性人为地造成了许多不确定因素。这需要软科学手段来解决。

(3) 复合材料及其结构使用工况的不确定因素。由于使用过程中的环境载荷的不确定性,使得复合材料结构所承受的载荷及其响应很难用数据或函数关系准确地表示出来,具有随机性、模糊性和未确知性,也需要用软科学手段解决。

5. 复合材料及其结构的虚拟设计

20 世纪 50 年代以前,对大型宏观结构主要是在物理模型上进行仿真实验,如船体比例模型在水槽内的模拟实验。模型仿真的方法就是利用相似理论将实际结构模型化后做实验,按相似准则找出各参数之间的函数关系,进而为工程结构设计提供合理的参考数据。相似性原理是几何学相似概念的推广,属线性范畴,其应用范围具有一定的局限

性。众所周知,与复合材料及其结构有关的许多特性及性能都是非线性的,如含夹杂复合材料的宏观弹性模量与夹杂的体积分数的关系是非线性的,因此仅仅靠比例模型是无法给出实际复合材料及其结构的性能。通常,复合材料结构具有很强的尺寸效应,需结合先进的实验技术和数值分析方法对其进行认真的研究。由于现代工业的高速发展,对产品结构的性能和可靠性提出了越来越高的要求。20世纪60年代以后,利用计算机技术出现了柔性制造系统(FMS, Flexible Manufacturing System)。80年代初,随着计算机仿真技术、信息处理技术的发展,出现了以信息集成为核心的计算机集成制造系统(CIMS, Computer Integrated Manufacturing System)。90年代出现了许多与计算机技术相关的新概念,如虚拟制造(VM, Virtual Manufacturing)、虚拟型号设计(VTP, Virtual Type Project)、虚拟企业(VE, Virtual Enterprise)、虚拟现实(VR, Virtual Reality)。计算机虚拟技术可以在抽象的数学模型上进行反复的仿真实验,大大降低研制开发费用、缩短研制周期。特别是能解决实验中难以解决的问题,避免危险实验对生命财产的危害。例如美国波音777客机的研制,从整机设计、制造、各部件性能的测试、组装都是通过虚拟技术实现的。

模型是仿真的基础,数学模型是数学仿真的基础。现代计算机技术的进步,大大提高了数学表示的地位,也使得数学仿真在仿真技术中占有特殊重要的地位。它的灵活、方便和通用性,是其他仿真方法无法与之比拟的。数学模型是在特定的建模目的支配和假设条件约束下,关于真实系统的科学抽象和映射。举个例子就可以说明这一点,如在薄板的经典层合板理论中,经常假定垂直于中面的法线在变形后仍保持直的并垂直中面,以及法线的长度不变。对于小挠度变形的情况,上述假定不仅给问题求解带来了方便,而且所得到的结果也具有一定的精度。用科学抽象的方法建立数学模型是对实际系统的近似描述,它不可能是无所不包的,也

不可能是完全精确的。这就是说,数学模型相对于实际系统而言已经是简化了。即使如此,人们在建立起数学模型之后,仍然觉得它很复杂,尤其是对于比较复杂的问题,因此不得不有意将它简化。实践告诉我们,对于特定的问题来说,决定其特征的各个参量并不是同等重要的,问题的关键在于抓住问题的主要矛盾,才能更好地揭示问题的本质。

复合材料分析(数学)模型是一个广义概念,它包含一系列与复合材料及其结构性能有关的问题,例如复合材料及其结构的力学性能分析模型(强度、刚度、损伤容限、断裂韧度、稳定性等)、材料选材规范、成型工艺方法(成型方法、工艺控制、工艺过程优化等)、连接问题等。目前,有些特殊问题已基本得到解决,如复合材料的刚度问题。然而,绝大多数问题目前还没有得到满意的解答,如复合材料的强度问题、可靠性问题等。这些问题在某种程度上限制了虚拟设计技术更为广泛的应用。比较明智的做法是,复合材料虚拟设计与其基本性能的研究齐头并进,随时吸收理论、数值分析及实验工作中的最新成果,为复合材料虚拟设计提供坚实、可靠的基础。

(1) 复合材料的虚拟技术

复合材料的设计包括功能设计、结构设计和工艺设计等三个部分。功能设计是指复合材料的性能满足使用条件的设计;结构设计是指由承载条件和工作环境、确定结构的形状和尺寸,以确保结构具有足够的使用寿命和可靠性;工艺设计是指满足性能与结构要求的成型方法,并做到制造成本低廉。计算成本时,不仅应考虑材料的成本,还应计及工序成本和维修费用。在复合材料的设计阶段,要求对设计的合理性和可靠性加以评价。同时在结构服役前,也希望对复合材料的工作状况,如对结构的静态和动态性能,进行预测。

对于复合材料的设计,由于其自身的特点,计算机仿真比较适用有效。计算机仿真虚拟技术,就是在计算机上实现复合材料的设计、制造、功能测