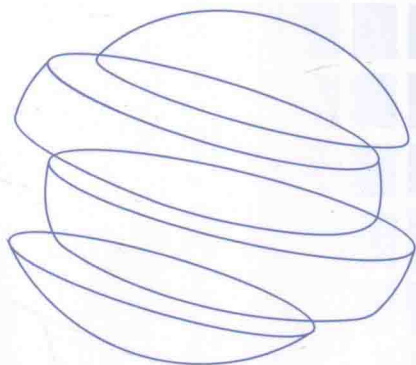
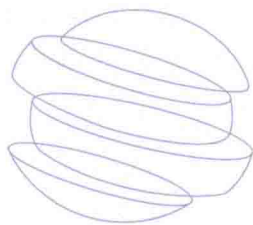


MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS

# 复合材料力学

□ 杨静宁 马连生 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 复合材料力学

MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS

杨静宁 马连生 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以基础理论和计算方法为重点,系统地阐述了复合材料的力学基础及宏观力学的基本理论和分析方法,重点阐明其概念、原理和基本分析方法,目的是使读者对复合材料及其力学分析有较全面的理解,为复合材料在航空航天、交通、建筑、医学等各个领域的合理应用提供基础的理论、计算和设计知识。内容包括:复合材料概述;各向异性材料的弹性理论;单层板的宏观力学分析;层合板的宏观力学分析;复合材料的强度理论;复合材料板的湿热效应;复合材料层合平板的弯曲、屈曲与振动;功能梯度板的宏观力学分析;智能材料概述等。

本书内容既有比较完整的理论基础,又力求叙述简洁、内容精练、简明实用,同时注意体现复合材料力学研究的新成果。书中配有适当的例题和习题,有助于学生自学。

本书可作为高等院校力学及相关专业本科生和研究生的教材使用,也可供从事复合材料结构设计、制造和复合材料研发的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

复合材料力学 / 杨静宁, 马连生编著. —北京:  
国防工业出版社, 2014. 7  
ISBN 978-7-118-09520-3

I. ①复... II. ①杨... ②马... III. ①复合材料力学  
IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 145618 号

※

国防工业出版社 出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)  
北京奥鑫印刷厂印刷  
新华书店经售



\*

开本 787 × 960 1/16 印张 11½ 字数 221 千字  
2014 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777 发行邮购:(010)88540776  
发行传真:(010)88540755 发行业务:(010)88540717

# 前 言

复合材料作为一种新型材料,具有比强度高、比刚度大、质量轻、耐高温、可设计、抗疲劳等一系列优点,与常规的金属材料相比,复合材料的力学性能比一般金属材料复杂得多,主要有不均匀、各向异性、不连续等。近几十年来复合材料在航空航天、土木建筑、交通、机械、医学、体育等领域得到广泛应用。采用先进复合材料,可解决许多用常规材料所不能解决的问题,大大改善结构的性能,可带来巨大的经济效益。随着各种新型复合材料的开发和应用,复合材料力学已形成独立的学科体系。为了正确设计、制造和使用复合材料,充分了解、掌握复合材料的特殊力学性能和分析方法,已成为对从事结构设计和有关专业人员的首要要求。

本书编者先后为工程力学本科生以及力学、材料、机械等学科相关专业的研究生开设复合材料力学课程,结合多年来从事复合材料力学课程教学以及科研的体会编写了本书。在编写过程中,注重以学习复合材料的力学基本知识和能力培养为目标,吸取了现有教材之所长。本书全面系统地阐述了复合材料宏观力学的基本理论、分析方法,并在相应章节给出研究成果。在编写过程中,力求将概念和原理阐述清楚,内容比较具体和深入,应用性较强。既有比较完整的理论基础,又力求叙述简捷、内容精练、简明实用,同时注意体现复合材料力学研究的新成果。书中配有适当的例题和习题,例题的数据均采用典型国产复合材料的性能数据,有助于学生自学。本书的着眼点不是深入地去研究各种理论,而是通过简单、典型情况的分析,使读者掌握各类问题的方程建立和求解方法。本书可作为高等院校力学及相关专业本科生和研究生的教材使用,也可供从事复合材料结构设计、制造和复合材料研发的工程技术人员参考。在教学中可按本科生和研究生的不同要求讲授不同的内容。

本书的编写自始至终得到兰州理工大学教务处以及国防工业出版社的宝贵支持,使本书得以顺利出版。第1章~第7章由兰州理工大学杨静宁编写,第8章、第9章由马连生编写,硕士研究生顾秉栋绘制了部分图形,全书由杨静宁进行统稿。在编写过程中,编者参考了国内外有关复合材料力学和复合材料结构力学相关的教材和文献,在此一并表

示衷心的感谢。

在编写出版本书的过程中,得到了兰州大学高原文教授的关心和详细审阅,在此向他们深表谢意。

限于作者水平,书中难免有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2014年3月

# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第 1 章 复合材料概述          | 1  |
| 1.1 绪论                | 1  |
| 1.1.1 复合材料的概念         | 1  |
| 1.1.2 复合材料的分类         | 2  |
| 1.2 复合材料的特点及应用        | 6  |
| 1.2.1 复合材料的特点         | 6  |
| 1.2.2 复合材料的优点         | 6  |
| 1.2.3 复合材料的缺点         | 7  |
| 1.2.4 复合材料的应用         | 7  |
| 1.3 复合材料的力学分析方法       | 11 |
| 1.3.1 细观力学            | 11 |
| 1.3.2 宏观力学            | 11 |
| 1.3.3 复合材料结构力学        | 12 |
| 1.4 复合材料力学分析的意义       | 12 |
| 习题                    | 13 |
| 第 2 章 各向异性材料的弹性理论     | 14 |
| 2.1 各向异性弹性理论基本方程      | 14 |
| 2.1.1 各向异性弹性力学基本方程    | 14 |
| 2.1.2 应变势能密度函数 $U$    | 17 |
| 2.1.3 具有一个弹性对称面的材料    | 20 |
| 2.1.4 正交各向异性材料        | 21 |
| 2.1.5 横观各向同性材料        | 23 |
| 2.1.6 各向同性材料          | 24 |
| 2.2 正交各向异性材料的工程弹性常数   | 25 |
| 2.2.1 正交各向异性材料的工程弹性常数 | 25 |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 2.2.2 正交各向异性材料工程弹性常数的限制 ..... | 29        |
| 习题 .....                      | 31        |
| <b>第3章 单层板的宏观力学分析 .....</b>   | <b>33</b> |
| 3.1 复合材料单层板主轴方向的应力—应变关系 ..... | 33        |
| 3.2 复合材料单层板偏轴方向的应力—应变关系 ..... | 38        |
| 3.2.1 应力转换公式 .....            | 38        |
| 3.2.2 应变转换公式 .....            | 40        |
| 3.2.3 单层板偏轴方向的应力—应变关系 .....   | 42        |
| 3.3 复合材料单层板偏轴方向的工程弹性常数 .....  | 45        |
| 3.4 复合材料静态力学性能测试 .....        | 49        |
| 3.4.1 拉伸性能测试 .....            | 50        |
| 3.4.2 压缩性能测试 .....            | 51        |
| 3.4.3 面内剪切性能测试 .....          | 52        |
| 3.4.4 层间剪切性能测试 .....          | 54        |
| 3.4.5 弯曲性能测试 .....            | 54        |
| 习题 .....                      | 57        |
| <b>第4章 层合板的宏观力学分析 .....</b>   | <b>58</b> |
| 4.1 层合板概述 .....               | 58        |
| 4.1.1 层合板的特性 .....            | 58        |
| 4.1.2 层合板的标记 .....            | 59        |
| 4.2 经典层合板理论 .....             | 61        |
| 4.2.1 层合板的基本假设 .....          | 61        |
| 4.2.2 层合板的应力—应变关系 .....       | 61        |
| 4.2.3 层合板的合内力及合内力矩 .....      | 63        |
| 4.3 单层板的刚度 .....              | 68        |
| 4.3.1 各向同性单层板 .....           | 68        |
| 4.3.2 横观各向同性单层板 .....         | 69        |
| 4.3.3 特殊正交各向异性单层板 .....       | 70        |
| 4.3.4 一般正交各向异性单层板 .....       | 71        |
| 4.4 对称层合板的刚度 .....            | 72        |
| 4.4.1 各向同性层组成的对称层合板 .....     | 73        |
| 4.4.2 特殊正交各向异性层组成的对称层合板 ..... | 75        |

|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| 4.4.3      | 正规对称正交铺设层合板              | 76         |
| 4.4.4      | 正规对称角铺设层合板               | 76         |
| 4.5        | 反对称层合板的刚度                | 77         |
| 4.5.1      | 反对称正交铺设层合板               | 77         |
| 4.5.2      | 规则反对称角铺设层合板              | 78         |
|            | 习题                       | 78         |
| <b>第5章</b> | <b>复合材料的强度理论</b>         | <b>80</b>  |
| 5.1        | 各向同性材料的强度理论              | 80         |
| 5.2        | 单层复合材料的强度理论              | 81         |
| 5.2.1      | 正交各向异性材料的强度指标            | 81         |
| 5.2.2      | 正交各向异性材料的二向强度理论          | 82         |
| 5.2.3      | 强度理论的选取原则                | 85         |
| 5.3        | 层合板的强度分析                 | 86         |
| 5.3.1      | 层合板强度概述                  | 86         |
| 5.3.2      | 层合板应力和应变分析               | 87         |
| 5.3.3      | 层合板的强度分析                 | 88         |
|            | 习题                       | 94         |
| <b>第6章</b> | <b>复合材料板的湿热效应</b>        | <b>96</b>  |
| 6.1        | 单层板的湿热变形                 | 97         |
| 6.1.1      | 单层板的热膨胀                  | 97         |
| 6.1.2      | 单层板的湿膨胀                  | 98         |
| 6.2        | 考虑湿热变形单层板的本构关系           | 99         |
| 6.3        | 考虑湿热变形层合板的本构关系           | 100        |
| 6.4        | 层合板的残余应变和残余应力            | 103        |
|            | 习题                       | 104        |
| <b>第7章</b> | <b>复合材料层合平板的弯曲、屈曲与振动</b> | <b>106</b> |
| 7.1        | 引言                       | 106        |
| 7.2        | 复合材料层合板的求解方法             | 107        |
| 7.2.1      | 双傅里叶级数解法                 | 107        |
| 7.2.2      | 里茨法                      | 108        |
| 7.2.3      | 伽辽金法                     | 109        |



|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 7.2.4      | 有限元法 .....                | 110        |
| 7.2.5      | 摄动法 .....                 | 110        |
| 7.2.6      | 动态松弛法 .....               | 111        |
| 7.2.7      | 打靶法 .....                 | 111        |
| 7.3        | 层合板的弯曲问题 .....            | 113        |
| 7.3.1      | 层合板的弯曲方程 .....            | 113        |
| 7.3.2      | 边界条件 .....                | 116        |
| 7.3.3      | 特殊层合板弯曲问题的求解 .....        | 116        |
| 7.4        | 层合板的屈曲问题 .....            | 123        |
| 7.4.1      | 层合板的屈曲方程 .....            | 124        |
| 7.4.2      | 边界条件 .....                | 125        |
| 7.4.3      | 特殊层合板屈曲问题的求解 .....        | 126        |
| 7.5        | 层合板的热屈曲问题 .....           | 131        |
| 7.6        | 层合板的振动问题 .....            | 134        |
| 7.6.1      | 层合板的振动方程 .....            | 134        |
| 7.6.2      | 特殊层合板振动问题的求解 .....        | 135        |
|            | 习题 .....                  | 140        |
| <b>第8章</b> | <b>功能梯度板的宏观力学分析 .....</b> | <b>142</b> |
| 8.1        | 功能梯度板的线性问题 .....          | 142        |
| 8.1.1      | 基本方程 .....                | 142        |
| 8.1.2      | 弯曲问题 .....                | 144        |
| 8.1.3      | 屈曲问题 .....                | 145        |
| 8.1.4      | 振动问题 .....                | 147        |
| 8.2        | 功能梯度圆板的非线性弯曲问题 .....      | 148        |
| 8.2.1      | 非线性问题的基本方程 .....          | 148        |
| 8.2.2      | 打靶法 .....                 | 151        |
| 8.2.3      | 数值结果及讨论 .....             | 153        |
| <b>第9章</b> | <b>智能材料概述 .....</b>       | <b>157</b> |
| 9.1        | 材料发展的新纪元——智能材料 .....      | 157        |
| 9.2        | 智能材料的内涵与定义 .....          | 158        |
| 9.2.1      | 智能材料的内涵 .....             | 158        |
| 9.2.2      | 智能材料的定义 .....             | 162        |

|       |              |            |
|-------|--------------|------------|
| 9.3   | 智能材料的复合准则    | 164        |
| 9.4   | 智能材料的几种基本组元  | 165        |
| 9.4.1 | 光导纤维         | 165        |
| 9.4.2 | 压电材料         | 165        |
| 9.4.3 | 电(磁)流变液      | 166        |
| 9.4.4 | 形状记忆材料       | 166        |
| 9.4.5 | 磁致伸缩材料       | 166        |
| 9.4.6 | 智能高分子材料      | 167        |
| 9.5   | 智能材料和结构的应用前景 | 167        |
| 9.5.1 | 用于航空、航天飞行器   | 167        |
| 9.5.2 | 用于建筑和工程结构中   | 168        |
| 9.5.3 | 用于机器人中       | 168        |
| 9.5.4 | 用于日常生活中      | 168        |
| 9.6   | 智能材料与结构展望    | 169        |
|       | <b>参考文献</b>  | <b>171</b> |

# 第 1 章 复合材料概述

## 1.1 绪 论

材料是人类生活的物质基础,也是社会发展的重要标志。随着社会的发展,先进技术对材料性能提出了更高的要求,而普通材料又不能满足这些要求,人们逐渐对复合材料 (composite material) 这种新型材料产生了浓厚的兴趣。其实自然界中的许多材料属于天然复合材料,如竹子,木材,动物的骨骼、牙齿、心脏、肌肉、皮毛和贝壳等。复合材料使用的历史悠久,可以追溯到几千年以前。比如古代中国人和犹太人用稻草或麦秸增强盖房的泥砖以及古埃及人将木板作不同方向排列用于造船的多层板,可以说是最原始的复合材料;南北朝时代由薄绸和漆粘结制成的中国漆器;一百多年前出现的混凝土(近代复合材料的标志)以及后来为了满足高层建筑强度的要求出现的钢筋混凝土;近代的木质胶合板、帘线增强橡胶做成的汽车轮胎以及 20 世纪 40 年代出现的玻璃纤维增强树脂 (glass fiber reinforced plastics, GFRP) 复合材料,俗称玻璃钢,都是复合材料的代表。20 世纪 60 年代,为了满足军用方面对材料力学性能的要求,碳纤维(carbon fiber)、硼纤维(boron fiber)以及有机纤维相继问世,复合材料的发展到了一个崭新的阶段。随后人们又研制出金属基、陶瓷基和碳-碳复合材料等,被统称为先进复合材料(advanced composites),先进复合材料虽然只有几十年的历史,但却取得了惊人的成绩。20 世纪 80 年代以来,随着现代航空航天、电子等高新技术领域的飞速发展,人们对使用的材料提出了更高的要求,传统的结构材料和功能材料以及先进复合材料已不能满足这些技术的要求,需要发展多功能化、智能化的结构功能材料。20 世纪 80 年代末,受到自然界生物具备某些能力的启发,美国、日本科学家首先将智能概念引入材料和结构领域,提出了智能材料和结构的新概念。复合材料的力学研究工作由此得到很大的发展。

### 1.1.1 复合材料的概念

广义地说,复合材料是由两种或两种以上不同性质的材料在宏观尺度上组成的新材料。该定义强调了“宏观尺度”和“新材料”两点。合金虽然在微观上可以辨认出是由多种元素(材料)组成的,但在宏观上呈现出各向同性性质,被认为是均质材料,因此不属于复合材料。而人工的复合材料是由两种或多种性能不同的单一材料用物理或化学方法、

经人工复合成的一种具有新性能的多相固体材料。复合材料通常由基体材料和增强材料两大相材料或组分构成,包容组分称为基体材料,被包容组分称为增强材料。复合材料不仅保持了组分材料自身原有的一些优良性能,并且有些性能是原来组分材料所没有的,成为一种新型材料。基体采用各种树脂或金属、非金属材料;增强材料采用各种纤维状材料或其他材料。增强材料在复合材料中起主要作用,由它提供复合材料的刚度和强度,基本控制其力学性能。基体材料起配合使用,支持和固定纤维材料,传递纤维间的载荷,保护纤维,防止磨损或腐蚀等。基体材料也可以改善复合材料的某些性能,如要求比重小,则选取树脂作基体材料;要求有耐高温性能,可用陶瓷作为基体材料。复合材料的力学性能比一般金属材料复杂得多,主要有不均匀、各向异性、不连续等,因此逐步发展成为复合材料特有的力学理论,称为复合材料力学,它是固体力学学科的一门新的分支。

### 1.1.2 复合材料的分类

复合材料从应用的性质可分为功能复合材料和结构复合材料两大类。应该说明的是,随着复合材料的发展,往往一种复合材料同时起着功能和结构的作用,因此功能复合材料和结构复合材料的界限目前已不很明显。功能复合材料主要具有一种或几种特殊的功能,例如,隔热、透波、隐身(吸波)、抗辐射、耐磨、导热等。它是目前日益得到重视和发展的新型复合材料,例如:导电复合材料、烧蚀材料、形状记忆复合材料、压电复合材料、磁致伸缩复合材料、摩阻复合材料等。

本书主要研究结构复合材料,结构复合材料是目前应用最广泛和最成熟的复合材料。结构复合材料可分为:颗粒复合材料;层状复合材料;纤维增强复合材料;功能梯度复合材料等。

#### 1. 颗粒复合材料

颗粒复合材料由悬浮在一种基体材料内的一种或多种颗粒材料组成。颗粒可以是金属,也可以是非金属。

(1) 非金属颗粒在非金属基体中的复合材料。最普通的例子是混凝土,它是由砂、石用水和水泥粘合在一起经化学反应而变成坚强的结构材料。还有如云母粉悬浮在玻璃或塑料中形成的复合材料。

(2) 金属在非金属基体中的复合材料。例如固体火箭推进剂是由铝粉和高氯酸盐氧化剂无机微粒放在如聚氨酯的有机粘结剂中组成的,微粒约占75%,粘结剂占25%。

(3) 非金属在金属基体中的复合材料。氧化物和碳化物微粒悬浮在金属基体中得到金属陶瓷。用于耐腐蚀的工具制造和高温应用:碳化钨在钴基体中的金属陶瓷用于高硬度零件制造,如金属拉丝模具;碳化铬在钴基体中的金属陶瓷有很高的耐腐蚀性和耐磨性,适用于制造阀门。

## 2. 层状复合材料

层状复合材料至少由两层不同材料复合而成,其增强性能有强度、刚度、耐腐蚀、耐磨损等,层合复合材料有以下几种。

(1) 双金属片。它由两种不同热膨胀系数的金属片层合而成,当温度变化时,双金属片产生弯曲变形,可用于温度测量和控制。

(2) 涂覆金属。将一种金属涂覆在另一种金属上,得到优良的性能。例如用 10% 的铜涂覆铝丝作为铜丝的替代物,铝丝价廉而质轻,但难于连接,导热性较差;铜丝价贵而较重但导热性好,易于连接。涂铜铝丝比铜丝价廉而性能好。

(3) 夹层玻璃。这是为了用一种材料保护另一种材料。普通玻璃透光但易脆裂,聚乙烯醇缩丁醛塑料韧性好但易被划损,夹层玻璃是两层玻璃夹包一层聚乙烯醇缩丁醛塑料,具有良好的性能。

(4) 夹层复合材料。是由两层成型金属面板或非金属面板之间填充芯材组成。具有质量轻、安装快捷、防火、耐火、保温隔热、可塑性强等特性。芯材主要有蜂窝和硬质泡沫塑料。目前市场上,应用最为广泛的是聚苯夹芯板(即 EPS 夹芯板),其内、外两面为玻璃钢板,夹芯层为聚苯乙烯泡沫,经真空技术高压复合而成。蜂窝夹层结构是复合材料的一种特殊类型,是用蜂窝芯材与各种材料的薄面板,经专用结构胶粘剂粘接而成的一种复合材料板,具有质量轻、强度高、刚性好的特点。蜂窝按材料分,有铝制蜂窝、玻璃布蜂窝和有机纤维纸质蜂窝,又称 Nomex 蜂窝。最早只应用于航空航天领域,现在已越来越多地用于其他工业领域,如汽车、船舶、机械平台、家具内饰、展示展览等行业。目前最常用的为铝面板—铝蜂窝夹层结构、碳纤维面板—铝蜂窝夹层结构、玻璃钢面板—玻璃钢蜂窝夹层结构等。

## 3. 纤维增强复合材料

各种长纤维比块状的同样材料强度高很多。例如普通平板玻璃在几十兆帕的应力下破裂,而商用玻璃纤维的强度可达 3000 ~ 5000MPa,实验室研究的玻璃纤维强度已接近 7000MPa,这是由于纤维与块状玻璃具体结构不同,纤维内部缺陷和位错比块状材料少得多。

纤维增强复合材料(fiber reinforced composite material, FRCM)按纤维种类分为玻璃纤维(其增强复合材料俗称为玻璃钢)、硼纤维、碳纤维、芳纶纤维复合材料等。

纤维增强复合材料按基体材料可分为树脂基、金属基、陶瓷基和碳(石墨)基复合材料几种。

纤维增强复合材料按纤维形状可分为连续纤维增强复合材料、短纤维增强复合材料、纤维布增强复合材料等。

纤维增强树脂复合材料是复合材料的典型代表,也是本书着重讨论的对象。不同的纤维和基体材料组成的复合材料性能也很不相同。以后我们常采用复合材料的简化表示

方法:增强材料/基体。表 1-1 中列出几种目前较成熟的复合材料的力学性能,为了对比和参考,表中还列出几种常规金属材料的性能和数据。

表 1-1 几种复合材料的力学性能

| 材料          | 相对密度 $\gamma$ | 纵向拉伸强度<br>$\sigma_b / \times 10 \text{MPa}$ | 纵向拉伸模量<br>$E / \times 10^5 \text{MPa}$ | 比强度<br>$(\sigma_b / \gamma) / \times 10 \text{MPa}$ | 比模量<br>$(E / \gamma) / \times 10^5 \text{MPa}$ |
|-------------|---------------|---|--|---|--|
| 玻璃/环氧       | 1.80          | 137   | 0.45                                   | 76.1  | 0.25   |
| 高强碳/环氧      | 1.50          | 133   | 1.55                                   | 88.7  | 1.03   |
| 高模碳/环氧      | 1.69          | 63.6  | 3.02                                   | 37.6  | 1.79   |
| 硼/环氧        | 1.97          | 152   | 2.15                                   | 77.1  | 1.09   |
| Kevlar49/环氧 | 1.38          | 131   | 0.78                                   | 94.9  | 0.57   |
| 碳/石墨        | 2.20          | 73.8  | 1.37                                   | 33.5  | 0.62   |
| 碳/铝         | 2.34          | 80  | 1.20                                   | 34.2  | 0.51   |
| 碳/镁         | 1.83          | 51  | 3.01                                   | 27.9  | 1.64   |
| 硼/铝         | 2.64          | 152   | 2.34                                   | 57.6  | 0.89   |
| 铝合金         | 2.71          | 29.6  | 0.70                                   | 10.9  | 0.26   |
| 镁合金         | 1.77          | 27.6  | 0.46                                   | 15.5  | 0.26   |
| 钛合金         | 4.43          | 10.6  | 1.13                                   | 23.9  | 0.26   |
| 钢(高强)       | 7.83          | 134   | 2.05                                   | 17.1  | 0.26   |

作为力学性能比较,常常采用比强度( $\sigma_b/\gamma$ )和比刚度( $E/\gamma$ )值两个参量。其中, $\sigma_b$ 为纵向拉伸强度, $E$ 为纵向拉伸模量, $\gamma$ 为相对密度。它们表示在重量相当情形下材料的承载能力和刚度,其值越大,表示性能越好。但是这两个参量是根据材料受单向拉伸时的强度和变形确定的,实际上结构受载条件和破坏方式是多种多样的,这时的力学性能不能完全用比强度和比刚度值来衡量,因此这两个值只是粗糙的定性性能指标。

玻璃纤维增强复合材料的特点是比强度高、耐腐蚀、电绝缘、易制造、成本低,很早就开始应用,现在应用很广泛;缺点是比刚度较低。

碳纤维复合材料有很高的比强度和比刚度,耐高温、耐疲劳、热稳定性好,但成本较高,现已逐步扩大应用,已成为主要的先进复合材料。

芳纶纤维增强复合材料是一种新的复合材料,它有较强的比强度和比刚度,成本比玻璃钢高,但比碳纤维复合材料低,正发展成较广泛应用的材料。

#### 4. 功能梯度复合材料

近些年来,功能梯度材料(functionally graded material, FGM)在极高温热环境下的应用越来越受到重视,同时还被认为是可用于未来高速航天器的一种潜在材料。功能梯度材料是一种复合材料,具有微观非均匀性,其力学性质从一个表面连续而平滑地变化到另

一个表面,这可以通过逐渐改变材料成分的体积百分比含量而实现。而这种成分含量的连续改变导致了功能梯度材料的梯度性质。

这种不同凡响的材料可由金属和陶瓷或者不同金属材料混合而成,其优点是可以在高热梯度环境下工作而能保持结构的完整和刚性。材料中的陶瓷成分因其低的导热率而提供了功能梯度材料可以抵御高温的能力,另一方面,金属成分因其高强度使功能梯度材料免于由热应力而引起的断裂。

微结构的连续变化是功能梯度材料和传统的层合复合材料的重要区别。纤维—基体复合材料在两材料的界面上存在力学性能的失配问题,在极高温载荷作用下会出现脱层现象,或者在界面上萌生裂纹,从而削弱材料的性能。另外,复合材料中纤维和基体间热膨胀系数的差异,会导致残余应力产生。通过逐渐地改变材料成分的体积百分比含量而不使其在界面上产生突变,就可以消除上述问题,如图 1-1 所示。材料的这种梯度性质减小了热应力、残余应力以及应力集中系数,从而消除了界面问题并使应力分布平缓。力学性能的渐进式变化使得功能梯度材料适合用于不同的场合和环境。

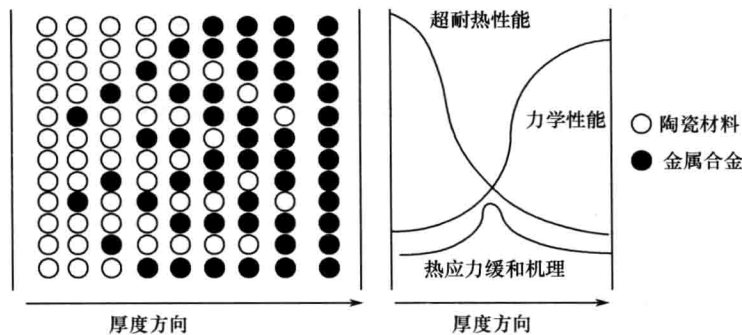


图 1-1 功能梯度材料性能示意图

功能梯度材料作为结构材料使用一般有两种形式:一是薄膜梯度材料,即将具有特殊功能的薄膜梯度材料喷涂在尺寸较大的基础材料上,对基础材料起保护作用;二是在双材料界面处增加性能变化的梯度层,构成夹心样式的三层结构。

功能梯度材料,比如金属—陶瓷材料,能够充分发挥陶瓷的良好的耐高温、抗腐蚀和金属的强度高、韧性好的特点;又能很好地解决金属和陶瓷之间热膨胀系数不匹配的问题。另外,功能梯度材料性质的可设计性,尤其是化学、材料以及微结构的梯度设计,是其又一显著特点。因此,功能梯度材料以其良好的隔热性能、热应力缓和性能以及材料性质的可设计性,在工程结构中具有广阔的应用前景。目前,随着功能梯度材料的研究和开发,其用途已由原来的宇航工业,扩大到核能源、电子、光学、化学、生物医学工程等领域;其组成也由金属—陶瓷发展成为金属—合金、非金属—非金属、非金属—陶瓷等多种组合,种类繁多。

## 1.2 复合材料的特点及应用

### 1.2.1 复合材料的特点

复合材料与传统材料(比如金属材料)相比具有如下特点:

(1) 各向异性。各向同性是指在物体内一点的每一个方向上都表现有相同的性能,也就是说某点的性能不是该点方向的函数。而各向异性则相反,如纤维增强复合材料在弹性常数、热膨胀系数和材料强度等方面有明显的各向异性性质。

(2) 不均匀性和不连续性。均质就是物体各点的性能相同,也就是说物体的性能不是物体位置位置的函数,而非均质正好相反。

层状复合材料除了层片内存在这种不均匀性外,沿厚度方向也呈层性。不均匀性和不连续性对强度的影响要比对刚度的影响更大,这是因为应力和强度是由局部的量决定的;而刚度和弹性模量则是纤维和基体的平均表现,是由整体的量决定的。

(3) 层间剪切模量较低,层间剪切和拉伸强度甚低。层间剪切模量只有纤维方向拉、压模量的数十分之一。因此,在分析复合材料结构问题时,必须考虑沿厚度方向的剪切影响。

(4) 拉、压模量/强度不同。

(5) 几何非线性和物理非线性。

### 1.2.2 复合材料的优点

(1) 比强度高、比刚度大。这两个参量是衡量材料承载能力的重要标志。比强度、比刚度大说明材料重量轻,而强度和刚度大,这是结构设计,特别是航空、航天结构设计对材料的重要要求。

(2) 具有可设计性。复合材料的力学性能可以设计,即可以通过选择合适的原材料和合理的铺层形式,使复合材料构件或复合材料结构满足使用要求。

(3) 抗疲劳性能好。复合材料的抗疲劳性能良好。一般金属的疲劳强度为抗拉强度的40%~50%,而某些复合材料可高达70%~80%。复合材料的疲劳断裂是从基体开始,逐渐扩展到纤维和基体的界面上,没有突发性的变化。因此,复合材料在破坏前有预兆,可以检查和补救。

(4) 减振性能好。复合材料的减振性能良好。纤维复合材料的纤维和基体界面的阻尼较大,因此具有较好的减振性能。用同形状和同大小的两种梁分别作振动试验,碳纤维复合材料梁的振动衰减时间比轻金属梁要短得多。



(5) 高温性能好。复合材料通常都能耐高温。在高温下,用碳或硼纤维增强的金属,其强度和刚度都比原金属的强度和刚度高很多。普通铝合金在 400℃ 时,弹性模量大幅度下降,强度也下降;而在同一温度下,用碳纤维或硼纤维增强的铝合金的强度和弹性模量基本不变。复合材料的热导率一般都小,因而它的瞬时耐超高温性能比较好。

(6) 复合材料的安全性好。在纤维增强复合材料的基体中有成千上万根独立的纤维。当用这种材料制成的构件超载,并有少量纤维断裂时,载荷会迅速重新分配并传递到未破坏的纤维上,因此整个构件不至于在短时间内丧失承载能力。

(7) 复合材料的成型工艺简单。纤维增强复合材料一般适合于整体成型,因而减少了零部件的数目,从而可减少设计计算工作量并有利于提高计算的准确性。另外,制作纤维增强复合材料部件的步骤是把纤维和基体粘结在一起,先用模具成型,而后加温固化,在制作过程中基体由流体变为固体,不易在材料中造成微小裂纹,而且固化后残余应力很小。

### 1.2.3 复合材料的缺点

(1) 材料各向异性严重。表 1-1 中所列性能都是沿纤维方向的,而垂直于纤维方向的性能主要取决于基体材料的性能和基体与纤维间的结合能力。

(2) 材料性能分散度大,质量控制和检测比较困难,但随着加工工艺的改进和检测技术的发展,材料质量可以提高。

(3) 材料成本较高。硼纤维复合材料最贵,碳纤维复合材料比金属成本高,玻璃纤维复合材料成本较低。

(4) 有些复合材料韧性较差,机械连接较困难。

以上缺点除各向异性是材料本身固有的外,有些还是可以设法改进的。总之,复合材料的优点远多于缺点,因此具有广泛的使用领域和巨大的发展前景。

### 1.2.4 复合材料的应用

20 世纪 40 年代初,由于航空工业和其他工业的需要,在设计制造高性能复合材料方面有很大的进展。玻璃纤维增强(树脂)复合材料(俗称玻璃钢)最早于 1942 年在美国生产和应用于军用飞机雷达天线罩,它具有承受飞行时的空气动力载荷、耐气候变化、在使用温度范围内尺寸稳定、能透过雷达波等性能。铝材可以满足强度方面的要求,但不能透过雷达波,陶瓷材料正好相反,而玻璃钢两方面都能满足要求,因此在飞机制造方面得到应用。由于玻璃钢弹性模量不够高,不能满足飞行器刚度方面的要求,20 世纪 60 年代,美、英等国先后研制成硼纤维、碳纤维、石墨纤维、芳纶纤维等增强的先进复合材料,并很快应用于航天、航空等领域。

航天飞行器中,为了将其送入地球轨道,必须超越第一宇宙速度——7.91 km/s。根据牛顿第二定律,飞行器得到的加速度与所受的力成正比,与其质量成反比,也就是