



高等学校土木工程类“十二五”规划教材

财政部文化产业发展专项资金资助项目
国家自然科学基金项目资助(项目编号: 51178064)

Highway engineering
compositematerials and their application

公路工程复合 材料及其应用

主编 姚佳良 周志刚 唐杰军
主审 张起森

湖南大学出版社



高等学校土木工程类“十二五”规划教材
财政部文化产业发展专项资金资助项目
国家自然科学基金项目资助（项目编号：51178064）

公路工程复合材料及其应用

主 编 姚佳良 周志刚 唐杰军
主 审 张起森

湖南大学出版社

内 容 简 介

本书根据作者近年来对公路工程复合材料的研究及实际工程运用经验而编写。详细介绍了公路工程中广泛应用的土工材料、钢纤维水泥混凝土、改性沥青及沥青混合料,聚合物类复合材料的工程特性,增强改性机理,制备方法,配比设计以及相应的工程设计方法和施工方法。

全书内容紧密联系工程实际,可供土木工程领域,尤其公路工程技术人员进行工程设计和施工参考,也可作为各相关专业的研究生教材和本科生的选修课教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

公路工程复合材料及其应用/姚佳良,周志刚,唐杰军主编.
—长沙:湖南大学出版社,2015.7

ISBN 978-7-5667-0908-0

I. ①公… II. ①姚… ②周… ③唐… III. ①道路工程—工程材料—复合材料 IV. ①U414.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第158929号

公路工程复合材料及其应用

GONGLU GONGCHENG FUHE CAILIAO JIQI YINGYONG

作 者:姚佳良 周志刚 唐杰军 主编

责任编辑:黄 旺 金红艳 责任校对:张建平 责任印制:陈 燕

印 装:虎彩印艺股份有限公司

开 本:787×1092 16开 印张:12.5 字数:297千

版 次:2015年8月第1版 印次:2015年8月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5667-0908-0/TU·192

定 价:28.00元

出 版 人:雷 鸣

出版发行:湖南大学出版社

社 址:湖南·长沙·岳麓山 邮 编:410082

电 话:0731-88822559(发行部),88821315(编辑室),88821006(出版部)

传 真:0731-88649312(发行部),88822264(总编室)

网 址: <http://www.hnupress.com> 电子邮箱: pressluy@hnu.edu.cn

版权所有,盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错,请与发行部联系

前 言

随着公路事业的蓬勃发展,传统单一材料很难满足公路工程对材料性能的综合要求和高指标要求,材料复合化成为土木工程材料发展的必然趋势。公路复合材料经过十几年的广泛应用,理论和技术水平得到了进一步发展,涌现了大批科研成果。《公路工程复合材料及其应用》一书汇集了编者十几年本课程教学和科研的经验体会,并收集了国内外有关复合材料方面的大量资料,由长沙理工大学交通运输工程学院、湖南省交通职业技术学院合作编写而成。

本书系统介绍了复合材料基本概念、复合原理以及公路工程中使用的主要复合材料的组成要求、材料性能、配合比设计和工程应用。第1章主要介绍了复合材料的发展史、复合材料的定义和分类、复合材料强化理论、复合材料湿热效应、基体与增强体的相容性、润湿性、复合材料的界面、复合效应及复合材料设计内容、设计方法。第2章主要阐述了土工合成材料的工程特性、界面摩擦特性及其功能,同时介绍了在工程中的主要应用。第3章主要介绍了钢纤维混凝土组成材料与工艺特性、钢纤维混凝土增强机理及界面性能、钢纤维混凝土的性能、钢纤维混凝土配合比设计与施工工艺及钢纤维水泥混凝土在工程中的应用。第4章主要介绍了改性沥青概念及分类、改性剂与改性沥青路面使用性能、聚合物改性剂的选择及改性效果的评价、改性沥青技术指标和标准、改性沥青的生产工艺和沥青马碲酯碎石混合料的基本概念与形成机理、特性、材料要求、混合料配合比设计、路面施工与质量验收。第5章主要介绍了聚合物基体、聚合物混凝土及聚合物在混凝土中的其他应用。第6章介绍路面功能层材料与路面预护性养护材料及其应用。第7章结合公路工程实际着重介绍了测定复合材料基本特性参数的试验研究方法。

本书第1章、第3章、第5章、第6章由姚佳良编写,第2章由周志刚编写,第4章由唐杰军编写,第7章由彭富强编写。全书由张启森教授审校。

本书可作为研究生教材,也可作为本科生选修课程教材,亦可供土木工程界相关技术人员参考。

由于作者水平有限,同时公路复合材料发展迅速,且某些机理尚待研究,书中不妥之处请读者指正。

本书编写与出版得到国家自然科学基金项目(项目编号:51178064)、国家自然科学基金青年项目(项目编号:51302020)和湖南省交通厅科研项目(合同号:201001)支助,在此表示感谢。

编 者

2015年8月于长沙

目 次

第1章 复合材料基础

- 1.1 复合材料的发展史 (1)
- 1.2 复合材料的定义和分类 (2)
- 1.3 复合材料增强原理 (5)
- 1.4 复合材料湿热效应 (16)
- 1.5 基体与增强体的相容性、润湿性 (17)
- 1.6 复合材料的界面 (19)
- 1.7 复合效应 (21)
- 1.8 复合材料设计的内容及设计方法 (23)

第2章 土工合成材料

- 2.1 土工合成材料的基本概念 (26)
- 2.2 土工合成材料的工程特性 (28)
- 2.3 土工合成材料的工程应用 (37)

第3章 钢纤维水泥混凝土

- 3.1 钢纤维混凝土组成材料与工艺特性 (45)
- 3.2 钢纤维混凝土增强机理及界面性能 (47)
- 3.3 钢纤维混凝土的性能 (52)
- 3.4 钢纤维混凝土配合比设计与施工工艺 (56)
- 3.5 钢纤维水泥混凝土在工程中的应用 (64)

第4章 改性沥青和改性沥青混合料

- 4.1 改性沥青 (77)
- 4.2 沥青玛蹄脂碎石混合料 (88)

第5章 聚合物基混凝土复合材料

- 5.1 聚合物基体 (121)
- 5.2 聚合物混凝土 (125)
- 5.3 聚合物在混凝土中的其他应用 (136)
- 5.4 聚合物复合材料的工程应用 (138)

第6章 路面功能层材料与路面预防性养护材料	
6.1 路面功能层材料	(145)
6.2 路面预防性养护材料	(155)
第7章 复合材料试验及研究方法	
7.1 复合材料试验	(170)
7.2 力学性能试验	(174)
7.3 耐久性试验	(182)
参考文献	(191)

第 1 章 复合材料基础

1.1 复合材料的发展史

复合材料的历史经历了早期复合材料和现代复合材料两个阶段。

早期复合材料的历史较长。中国西安半坡村原始人遗址（即仰韶文化）中发现用草拌泥作墙体和地面，即可看成以天然纤维状材料——草作为粘土的增强剂，以土作基体的纤维复合材料，增进了粘土的实用性能。公元前 3 000 年左右，古埃及和美索不达米亚人用芦苇、纸莎草加沥青或树胶制造的小艇，可看作现代复合材料船的前身。中国西周时期（约公元前 1 000 年）用木片或竹片、动物的腱和鬃、比等制作弓，是混杂复合材料的祖先。中国春秋战国时期（距今约 2 500 年），用含锡量较低的青铜作剑身，采用两次浇注技术，在其刃部复合一层含锡量较高的青铜，并在锡青铜表面涂覆一层硫化铜（含铬和镍）制成花纹，使其内柔外刚，刚柔并济，作为其代表的著名的越王勾践剑，1965 年在湖北江陵楚墓出土时，仍然光可鉴人，锋利异常，被誉为“永不生锈的青铜剑”，可看成是最早的包层金属复合材料。印度人用细砂和虫胶制作磨刀石，这是现代砂轮的前身，是颗粒增强复合材料。公元前埃及金字塔采用了砂石和火山灰制成的混凝土，这也可看成是颗粒复合材料。中国民间的布底鞋，代表着三向编织复合材料的雏形。工业革命以后，欧美发达国家发明了薄片加工机械和各种锯，并与粘接剂（胶）技术结合，才演变到胶合板和装饰板的工业生产，这是叠层复合材料的前身。

早期复合材料中最具代表性的例子是中国古代发明的漆器。1972—1974 年，湖南省马王堆出土的漆器（距今 2 200 年以上）是西汉初年的文物。这些漆器用丝和麻作增强材料，用大漆作粘接剂，或以木材为胎，外表涂以漆层，制成鼎、酒壶、盆具、茶几等物品，在潮湿地下埋藏了 2 000 多年，依然是熠熠生辉、光彩夺目。中国早在 7 000 多年前的新石器时代，就有了油漆技术的萌芽，在商代已经成熟。在战国时代，除了木胎漆器外，又出现皮胎漆器和夹苎胎（即用麻布作胎）的漆器。秦、汉时期以后，油漆技术经历了大发展并基本定型。魏晋南北朝时期，在改革底胎和面漆的基础上，创造了夹苎胎法制造佛像的工艺，即先塑出泥胎，再在泥胎外面粘麻布，在麻布上进行涂漆和彩绘，当油漆干燥后，挖出并用水冲去泥胎，得到中空的漆佛像。这种佛像十分轻巧且非常坚固耐久，几米高的佛像，一个人就能轻易举起行走（称为“行像”），其制造工艺与当今的手糊成型几乎没有区别。大约在唐朝，脱胎漆佛像技术传到日本。日本至今还保存着当年唐代著名高僧鉴真和尚东渡日本在该国圆寂时塑制的夹苎座像，作为日本的“国宝”级文物，每年只对外开放数天供人瞻仰。这座佛像经历了 1 000 多年仍然保持完好，充分显示了这种早期复合材料优异的抗老化性能。

现代复合材料始于 20 世纪 40 年代初，它的主要特征是基本采用合成材料。1940

年，世界上第一次用玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂制造了军用飞机雷达罩。1942年，用手糊工艺制成第一艘玻璃钢渔船。到20世纪60至70年代，玻璃纤维增强塑料（简称为GFRP，俗称玻璃钢）制品已经广泛应用于航空、机械、化学、体育和建筑工业中。这种复合材料中玻璃钢的比强度（即拉伸强度/密度）比钢还要高，而且耐腐蚀性能好，被称为第一代现代复合材料。

20世纪80年代以后，由于复合材料设计、制造和测试等技术的完善，如层合板力学性能的准确计算，短纤维或连续纤维的纱束、垫、毡或编织物、编织布及预浸料的制作，模压、缠绕、拉挤、注射等成型工艺的出现，性能标准化以及玻璃纤维、树脂等原材料的不断改进，使玻璃纤维增强塑料的发展达到成熟阶段。复合材料目前已被广泛用于交通、建筑、能源、化工、医疗、电器、军事、宇航和体育等领域。

1.2 复合材料的定义和分类

1.2.1 复合材料的定义

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，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、含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。

根据复合材料的定义，复合材料具有如下特点：

- (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，它具有新的、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。

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。

1.2.2 复合材料的结构

复合材料由两种以上组分以及它们之间的界面构成。组分材料主要指增强体和基体。它们也被称为复合材料的增强相和基体相。增强相与基体相之间的界面区域因为其特殊的结构与组成也被看作复合材料中的界面相。增强相和基体相是根据它们组分的物理和化学性质和在最终复合材料中的形态来区分的。其中一个组分是细丝（连续的或短切的）、薄片或颗粒状，具有较高的强度、模量、硬度和脆性，在复合材料承受外加载荷时是主要承载相，称为增强相或增强体（reinforced phase or reinforcement）。它们在复合材料中呈分散形式，被基体相隔离包围，因此也称作分散相；另一个组分是包围增强相并相对较软和韧的贯连材料，称为基体相（matrix phase）。

在形成复合材料前，基体材料的形状可以是薄片、粉末、块体或无定形的流体，它的状态可以是固态、气态、熔融态或半固半液态。但是在与增强相固结后，基体相在复合材料中就成为包裹增强相的连续体。因此，基体相也叫作连续相。基体相具有支撑和保护增强相的作用，在复合材料承受外加载荷时，基体相主要以剪切变形的方式起向增强相分配和传递载荷的作用。

在复合材料中，增强相和基体相之间存在着明显的结合面。位于增强相和基体相之间并使这两相彼此相连的，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（interfaces）。通常复合材料中界面层的厚度在亚微米以下，但界面层的总面积在复合材料中相当可观，且复合材料界面特征对复合材料的性能、破坏行为及应用效能有很大影响。关于复合材料界面的研究，称为复合材料的表面和界面工程（surface and interface engineering）。

复合材料的性能取决于组分材料的种类、性能、含量和分布，包括增强体的性能和它的表面物理、化学状态，基体的结构和性能，增强体的配置、分布和体积含量，复合材料性能还取决于复合材料的生产、复合方法、环境条件。

1.2.3 复合材料分类

复合材料可以按增强物的形状和基体的类型两种方式分类。按增强物（剂）的形态可分为三类：颗粒状的、纤维状的及层状的，如图 1-1。沥青混凝土混合料，就是颗粒状的复合材料，即由适当比例的粗集料、细集料及填料与沥青在严格控制条件下拌和的沥青混合料。如以玻璃纤维、碳纤维或硼纤维等陶瓷材料作为复合材料的增强剂，以塑料、树脂、橡胶、金属、水泥或混凝土等做基体而组成的各种复合材料是纤维增强复合材料；由多层薄木板交替铺设的胶木板是层压复合材料。



图 1-1 复合材料结构示意图

按基体材料的类型，也可分为三类：树脂复合材料（Resin Matrix Composite）、金属基复合材料（Metal Matrix Composite）和陶瓷基复合材料（Ceramic Matrix Composite）。

1.2.4 复合材料特性

由于复合材料能集中和发扬组成材料的优点，并能实行最佳结构设计，所以具有许多优点。

1.2.4.1 比强度和比模量高

比强度是强度与密度之比，比强度高的材料能承受高的应力，而且刚性大。比模量是弹性模量与密度之比，比模量高说明材料轻而且刚性大。因为，一方面复合材料多数情况是增强剂为密度不大的材料（如玻璃纤维、碳纤维和硼纤维），或者基体为密度小的物质（如高聚物），或者两者的密度都不高（如碳纤维增强树脂）。增强剂和基体密度都大的情况较少，而且这类材料都不是完全致密的。另一方面，增强剂多是强度很高

的纤维。所以，复合材料的比强度和比模量都很高（如有方向性时，则只有某一方向的比强度和比模量高）。

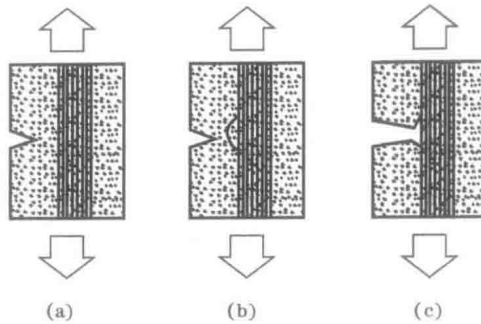


图 1-2 复合材料中疲劳裂纹扩展示意图

1.2.4.2 抗疲劳性能好

疲劳性能是材料在循环应力作用下的性能。复合材料抗疲劳的性能好，首先，因为缺陷少的纤维疲劳抗力高。其次，基体的塑性好，能消除或减小应力集中区的大小和数量，使疲劳源（纤维和基体中的缺陷处、界面上的薄弱点）难以萌生出微裂纹。即使微裂纹形成，如图 1-2 所示，塑性变形也能使裂纹尖端钝化，减缓其扩展。在裂纹缓慢的扩展过程中，基体的纵向拉压会引起其横向的膨胀，而在裂纹尖端的前缘造成基体与纤维的分离（见图 1-2），所以经过一定的应力循环之后，裂纹由横向改沿纤维—基体界面纵向扩展（见图 1-2）。由于基体中密布着大量纤维，疲劳断裂时，裂纹的扩展常要经历非常曲折和复杂的路径，因此，复合材料的疲劳强度都很高。碳纤维增强树脂的疲劳强度为拉伸强度的 70% ~ 80%，而一般金属材料仅为 30% ~ 50%。

1.2.4.3 减振能力强

构件的自振频率与结构有关，并且与比模量的平方根成正比。复合材料的比模量大，所以它的自振频率很高，在一般加载速度或频率的情况下，不容易发生共振而快速脆断。此外，复合材料是一种非均质多相体系，在其中存在大量（纤维与基体）的界面，界面对振动有反射和吸收作用，一般基体的阻尼也很大。因此，在复合材料中振动的衰减都很快。图 1-3 所示钢和碳纤维复合材料的阻尼特性，可见复合材料的减振速度比钢快，即振幅衰减到零的时间比钢短。

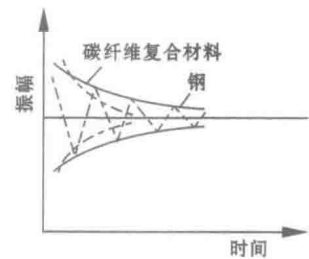


图 1-3 两种材料的阻尼特性的比较

1.2.4.4 高温性能好

增强剂纤维多有较高的弹性模量，因而常有较高的熔点和高的的高温强度。碳纤维在高温下的抗拉强度不但不下降，反而有所上升，超过了氧化铝晶须（晶须是指直径小于 30 μm 、长度只有几微米的由晶体生长形成的针状短纤维）。玻璃纤维由于其熔点较低，高温性能不如碳纤维。

此外，由于复合材料高温强度好、耐疲劳性能好和纤维与基体的相容性好，因而热

稳定性也很好。

1.2.4.5 断裂安全性高

纤维增强复合材料每平方厘米上有成千上万根隔离的细纤维，当其受力时，将处于力学上的静不定状态。过载会使其中部分纤维断裂，但随即迅速进行应力的重新分配，而由未断纤维将荷载承担起来，不致造成构件在瞬间完全丧失承载能力而断裂，所以工作的安全性高。

总之，不同的材料互相复合后，性能上既保留各自的优点，又得到了单一材料无可比拟的综合性能。除上述特性外，复合材料的化学稳定性一般均好，耐酸碱性及耐磨性也好。

1.3 复合材料增强原理

复合材料的复合不是组成材料的简单组合，而是一种包括物理的、化学的、力学的，甚至生物学的相互作用的复杂结合过程。复合材料的复合原理，是反映各种因素（工艺因素，基体和增强材料的性能，增强材料的形状、含量、分布，界面结合情况）对复合材料性能的影响规律。按照复合原理，可以对所需要研究和开发的复合材料性能，包括力学、物理、化学性能进行设计、预测和评估。不同的复合材料其增强的实质和某些规律各有其特点，可以概述如下：

1.3.1 粒子改性复合材料增强机理及混合律

粒子改性复合材料按基体种类不同分为粒子改性塑料、粒子改性橡胶、粒子改性金属、粒子改性沥青、粒子改性陶瓷等。粒子在复合材料中高度分散，对于细粒增强复合材料而言，细粒相在聚合物体中可阻碍聚合物大分子链的运动；在陶瓷体中有裂纹屏蔽效应等；在金属基体中，粒子有阻止产生位错的能力。粗大颗粒增强复合材料中，粗大颗粒的加入主要是为了获得一种综合性能。

聚合物基粒子复合材料粒子分散质增强机理，是因填料粒子的活性表面能与若干高分子链相结合形成一种交联结构，当其中一分子链受到应力，可以通过交联点将应力分散传递到其他分子链上，如果其中某一根链发生断裂，其他链可以照样起作用，不至于危及整体。如碳黑增强橡胶时，橡胶分子链可能接枝在碳黑粒子的表面，见图1-4。为了提高增强效果，可对填料粒子进行化学处理，以增强与大分子的结合力。例如，用硫醇处理二氧化硅表面，再用二烯类单体进行接枝聚合，可大大增强与橡胶基体的结合力。

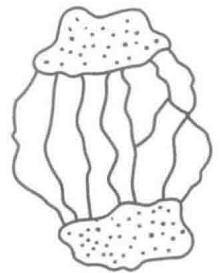


图1-4 粒状填料增强机理

陶瓷基粒子复合材料微裂纹机理主要特征是：烧结体在冷却过程中体内产生内应力，有时甚至形成微裂纹，这是由于颗粒与基体热膨胀不匹配或者由于相变体积膨胀所致。这些应力场或微裂纹可使试样在受力过程中主裂纹前端的应力场发生变化，主裂纹偏转、分叉、延长断裂路线，吸收更多的断裂能，因而提高了材料的强度。

上述颗粒增强原理根据粒子尺寸的大小分两类：弥散增强原理和颗粒增强原理。

1.3.1.1 弥散增强原理

弥散增强复合材料是由弥散微粒与基体复合而成，粒子直径为 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ ，体积分数为 $1\% \sim 15\%$ ，其增强机理与金属材料析出强化机理相似，可用位错绕过理论解释，见图 1-5。载荷主要由基体承担，弥散微粒阻碍基体的位错运动。微粒阻碍基体位错运动能力越大，增强效果愈大。

在剪应力 τ_i 的作用下，位错的曲率半径为

$$R = \frac{G_m b}{2\tau_i}, \quad (1-1)$$

式中， G_m 为基体的剪切模量， b 为柏氏矢量。若微粒之间的距离为 D_f ，当剪切应力大到使位错的曲率半径 $R = D_f/2$ 时，基体发生位错运动，复合材料产生塑性变形，此时剪切应力 τ_c 即为复合材料的屈服强度

$$\tau_c = \frac{G_m b}{D_f}. \quad (1-2)$$

假设基体的理论断裂应力为 $G_m/30$ ，基体的屈服强度为 $G_m/100$ ，它们分别为发生位错运动所需剪应力的上下限。代入公式 (1-2) 得到微粒间距的上下限分别为 $0.3 \mu\text{m}$ 和 $0.1 \mu\text{m}$ 。当微粒间距在 $0.01 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 之间时，微粒具有增强作用。

若微粒直径为 d_p ，体积分数为 V_p ，微粒弥散且均匀分布。根据体视学，有如下关系：

$$D_f = \sqrt{\frac{2d_p^2}{3V_p}} (1 - V_p), \quad (1-3)$$

$$\tau_c = \frac{G_m b}{\sqrt{\frac{2d_p^2}{3V_p}} (1 - V_p)}. \quad (1-4)$$

显然，微粒尺寸越小，体积分数越高，强化效果越好。一般， $V_p = 0.01 \sim 0.15$ ， $d_p = 0.001 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。

1.3.1.2 颗粒增强原理

颗粒增强复合材料是由尺寸较大 ($> 1 \mu\text{m}$) 的坚硬颗粒与基体复合而成，粒子直径为 $1 \sim 50 \mu\text{m}$ ，体积分数 $> 20\%$ ，其增强原理与弥散增强原理有区别。在颗粒增强复合材料中，虽然载荷主要由基体承担，但颗粒也承受载荷并约束基体的变形，颗粒阻止基体位错运动的能力越大，增强效果越好。在外载荷的作用下，基体内位错滑移在基体—颗粒界面上受到阻滞，并在颗粒上产生应力集中，其值为

$$\sigma_i = n\sigma. \quad (1-5)$$

根据位错理论，应力集中因子为

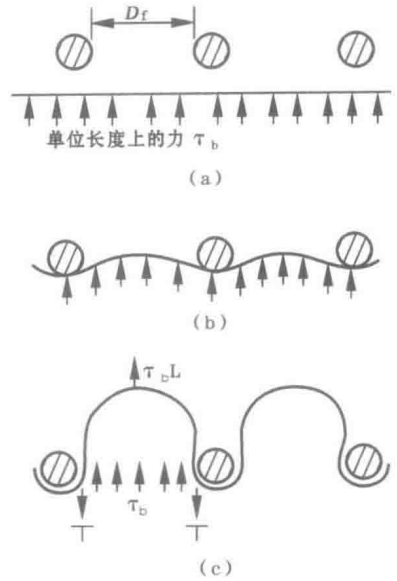


图 1-5 弥散增强原理图

$$n = \frac{\sigma D_f}{G_m b}, \quad (1-6)$$

代入上式得到

$$\sigma_i = \frac{\sigma^2 D_f}{G_m b} \circ \quad (1-7)$$

如果 $\sigma_i = \sigma_p$ 时, 颗粒开始破坏, 产生裂纹, 引起复合材料变形, 令 $\sigma_p = \frac{G_p}{c}$, 则有

$$\sigma_i = \frac{G_p}{c} = \frac{\sigma^2 D_f}{G_m b}, \quad (1-8)$$

式中, σ_p 为颗粒强度, G_p 为颗粒的剪切模量, c 为常数。由此得出颗粒增强复合材料的屈服强度为

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{G_m G_p b}{D_f c}} \circ \quad (1-9)$$

将体视学关系式 (1-3) 代入得到

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sqrt{3} G_m G_p b \sqrt{V_p}}{\sqrt{2} d (1 - V_p) c}} \circ \quad (1-10)$$

显然, 颗粒尺寸越小, 体积分数越高, 颗粒对复合材料的增强效果越好。一般在颗粒增强复合材料中, 颗粒直径为 $1 \sim 50 \mu\text{m}$, 颗粒间距为 $1 \sim 25 \mu\text{m}$, 颗粒体积分数为 $0.05 \sim 0.5$ 。

1.3.1.3 混合律

设 x_c 为复合材料的物性值, 而变量 x_1, x_2, x_3, \dots 为组成复合材料各组分的物性值, 当它们是 x_c 的函数时, 则可以表示为

$$x_c = f(x_1, x_2, x_3, \dots) \circ \quad (1-11)$$

若 $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$ 为各组分材料的体积与复合材料总体积的体积率时, 则有以下的线性组合关系:

$$x_c = \nu_1 x_1 + \nu_2 x_2 + \nu_3 x_3 + \dots \circ \quad (1-12)$$

若复合材料的粒子或纤维与基体的连接界面是完善的, 则有如下一般形式的混合定律:

$$x_c^n = \nu_1 x_1^n + \nu_2 x_2^n + \dots + \nu_n x_n^n, \quad (1-13)$$

式中, $n=1$ 时, 基体、纤维 (粒子) 为并联模型; $n=-1$ 时, 基体、纤维 (粒子) 为串联模型。

利用混合律可以预测复合材料的某些性质。例如, 颗粒状复合材料的密度可表示为

$$\rho_c = \sum f_i \rho_i = f_1 \rho_1 + f_2 \rho_2 + \dots + f_n \rho_n, \quad (1-14)$$

式中, ρ_c 为复合材料的密度; ρ_i 为复合材料中各成分的密度; f_i 为每种组成物质的体积分数。

但混合律不适于推算粒子增强复合材料的硬度和强度。

假定粒子形状为立方体, 粒子增强复合材料的弹性模量 E_c 近似为

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{E_p + (E_m - E_p)(1 - f_p)^{2/3}}{E_p + (E_m - E_p)(1 - f_p)^{2/3} [1 - (1 - f_p)^{1/3}]}, \quad (1-15)$$

式中，下标 p, m 分别代表增强粒子和基体；f 表示体积分数。

例题 1-1 某种硬质合金材料含有 75% (质量) WC, 15% (质量) TiC, 5% (质量) TaC, 5% (质量) CO, 已知该复合材料中各成分的密度为: $\rho_{WC} = 15.77\text{g/cm}^3$, $\rho_{TiC} = 4.94\text{g/cm}^3$, $\rho_{TaC} = 14.5\text{g/cm}^3$, $\rho_{CO} = 8.98\text{g/cm}^3$ 。试估算该复合材料的密度。

解 据此可求得各成分的体积百分数为

$$f_{WC} = \frac{75/15.77}{75/15.77 + 15/4.94 + 5/14.5 + 5/8.9} = 0.547,$$

同样可得

$$f_{TiC} = 0.349, f_{TaC} = 0.04, f_{CO} = 0.064。$$

由混合律可得该复合材料的密度为

$$\rho_c = \sum f_i \rho_i = 0.547 \times 15.77 + 0.349 \times 4.94 + 0.04 \times 14.5 + 0.064 \times 8.9 = 17.5\text{g/cm}^3。$$

例题 1-2 已知沥青混合料的各种矿料的质量配合比 (P'_1, P'_2, \dots, P'_n) (%)；各种矿料的相对密度 ($\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$)；沥青含量 (沥青质量占沥青混合料总质量的百分率) P'_b , ($\sum P'_i + P'_b = 100$ (%)；沥青的相对密度 γ_b (25/25 °C)。试求沥青混合料试件的最大理论相对密度 (压实沥青混合料试件全部为矿料和沥青所组成, 空隙率为零时的最大理论相对密度)。

解 据已知条件, 可求得各成分 (矿料和沥青) 的体积百分数为

$$f_1 = \frac{P'_1/\gamma_1}{P'_1/\gamma_1 + \dots + P'_n/\gamma_n + P'_b/\gamma_b};$$

$$f_n = \frac{P'_n/\gamma_n}{P'_1/\gamma_1 + \dots + P'_n/\gamma_n + P'_b/\gamma_b};$$

$$f_b = \frac{P'_b/\gamma_b}{P'_1/\gamma_1 + \dots + P'_n/\gamma_n + P'_b/\gamma_b}。$$

由混合律可得沥青混合料的最大理论相对密度为

$$\rho'_i = \sum f_i \rho_i = \frac{100}{P'_1/\gamma_1 + \dots + P'_n/\gamma_n + P'_b/\gamma_b},$$

1.3.2 单向排列连续纤维复合材料增强原理

在对高性能纤维复合材料结构进行设计时使用最多的是层板理论。在层板理论中, 纤维复合材料被认为是单向层片按照一定的顺序叠放起来, 保证了层板具有所要求的性能。已知层片中主应力方向的弹性和强度参数就可以预测层板的相应行为。

复合材料性能与组分性能、组分分布以及组分间的物理、化学作用有关。复合材料性能可以通过实验测量确定, 也可借助数学模型分析某些单向复合材料纵向性能。

单向纤维复合材料中的单层板如图 1-6 所示。平行于纤维方向称作纵向, 垂直于纤维方向称为横向。

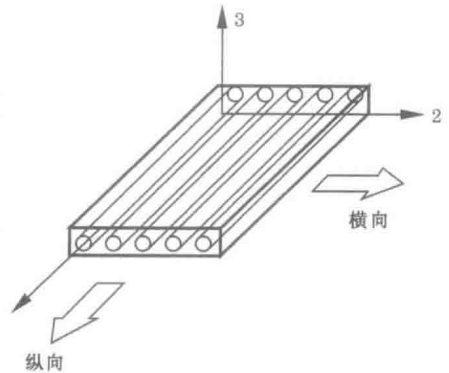


图 1-6 单向复合材料中的单层板

1.3.2.1 纵向强度和刚度预报

(1) 复合材料应力—应变曲线的初始阶段。连续纤维增强复合材料层板受沿纤维方向的拉伸应力作用，假设纤维性能和直径是均匀的、连续的并且全部相互平行；纤维—基体之间的结合是完美的，在界面无相对滑动发生；忽略纤维和基体之间的热膨胀系数、泊松比以及弹性变形差所引起的附加应力。整个材料的纵向应变可以认为是相同的，即复合材料、纤维和基体具有相同的应变。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \circ \quad (1-16)$$

考虑到在沿纤维方向的外加载荷由纤维和基体共同承担，应有

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m, \quad (1-17)$$

式中， A 表示复合材料中相应组分的横截面积，上式可转化为

$$\sigma_c = \sigma_f A_f / A_c + \sigma_m A_m / A_c \circ \quad (1-18)$$

对于平行纤维的复合材料，体积分数等于面积分数

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \circ \quad (1-19)$$

复合材料、纤维、基体的应变相同，对应变求导数，得到

$$\frac{d\sigma_c}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma_f}{d\varepsilon} V_f + \frac{d\sigma_m}{d\varepsilon} V_m \circ \quad (1-20)$$

$d\sigma/d\varepsilon$ 表示在给定应变时相应应力-应变曲线的斜率。如果材料的应力-应变曲线是线性的，则斜率是常数，可以用相应的弹性模量代入，得到

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m, \quad (1-21)$$

式 (1-19)、式 (1-20)、式 (1-21) 表明纤维、基体对复合材料平均性能的贡献正比于它们各自的体积分数，符合混合律法则。

在纤维与基体都是线弹性情况下，纤维与基体承担应力与载荷的情况推导如下：

$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m}, \quad (1-22)$$

因此有

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_m} = \frac{E_f}{E_m}, \quad \frac{\sigma_f}{\sigma_c} = \frac{E_f}{E_c} \circ \quad (1-23)$$

可以看出，复合材料中各组分承载的应力比等于相应弹性模量比，为了有效地利用纤维的高强度，应使纤维有比基体高得多的弹性模量。复合材料中组分承载比可以表达为

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_m A_m} = \frac{V_f E_f}{V_m E_m}, \quad (1-24)$$

$$\frac{P_f}{P_c} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_f A_f + \sigma_m A_m} = \frac{\frac{E_f}{E_m}}{\frac{E_f}{E_m} + \frac{V_m}{V_f}} \circ \quad (1-25)$$

上式表明：纤维—基体弹性模量比值越高，纤维体积含量越高，则纤维承载越大。因此对于给定的纤维—基体系统，应尽可能提高纤维的体积分数。但体积分数过高时，由于基体对纤维润湿、浸渍程度的下降，造成纤维—基体界面结合降低、气孔率增加，

复合材料性能反而变坏。

(2) 复合材料初始变形后的行为。一般复合材料的变形有四个阶段：纤维和基体均为线弹性变形；纤维继续线弹性变形，基体非线性变形；纤维和基体都是非线性变形；随纤维断裂，复合材料断裂。对于延性大的复合材料来说，由于基体的塑性变形，第二阶段可能占复合材料应力-应变曲线的相当部分，这时复合材料的弹性模量可按下式计算：

$$E_c = E_f V_f + \left(\frac{d\sigma_m}{d\varepsilon} \right) \varepsilon_c V_m, \quad (1-26)$$

式中， $d\sigma_m/d\varepsilon$ 是相应复合材料应变为点 ε_c 基体应力-应变曲线的斜率。一般脆性纤维复合材料未进入第三阶段。

(3) 断裂强度与纤维最小体积分数。对于纵向受载的单向纤维复合材料，当纤维达到其断裂应变值时，复合材料开始断裂。

① 基体断裂应变大于纤维断裂应变。当基体断裂应变大于纤维断裂应变时，理论计算时一般假设所有的纤维在同一应变值断裂。如果纤维的断裂应变值比基体小，在纤维体积分数足够大时，基体不能承担纤维断裂后转移的全部载荷，则复合材料断裂。这种条件下，复合材料纵向断裂强度可以认为与纤维断裂应变值对应的复合材料应力相等，依据混合律可得到复合材料纵向断裂强度

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + (\sigma_m)_{ef} (1 - V_f), \quad (1-27)$$

式中， σ_{fu} 是纤维的强度， $(\sigma_m)_{ef}$ 是对应纤维断裂应变值的基体应力。

在纤维体积分数很小时，基体能够承担纤维断裂后所转移的全部载荷，随基体应变增加，基体进一步承载，并假设在复合材料应变高于纤维断裂应变时纤维完全不能承载。这时复合材料的断裂强度为

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} (1 - V_f), \quad (1-28)$$

式中， σ_{mu} 是基体强度。

联立式 (1-27)，式 (1-28)，得到纤维控制复合材料断裂所需的最小体积分数（当基体断裂应变大于纤维断裂应变时，纤维断裂后，基体能够承担纤维断裂后转移给它的荷载而不使复合材料承载能力下降的最小纤维体积率）。

$$V_{\min} = \frac{\sigma_{mu} - (1 - \sigma_m)_{ef}}{\sigma_{fu} (1 - \sigma_m)_{ef}}. \quad (1-29)$$

② 基体断裂应变小于纤维断裂应变。当基体断裂应变小于纤维断裂应变时，纤维断裂应变值比基体大的情况与纤维增强陶瓷基复合材料的情况一致。在纤维体积分数较小时，纤维不能承担基体断裂后所转移的载荷，则在基体断裂的同时复合材料断裂，由混合律得到复合材料纵向断裂强度

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu}^* V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f), \quad (1-30)$$

式中， σ_{mu} 是基体强度， σ_{fu}^* 为对应基体断裂应变时纤维承受的应力 $\varepsilon_{mu} E_f$ 。

在纤维体积分数较大时，纤维能够承担基体断裂后所转移的全部载荷，假如基体能够继续传递载荷，则复合材料可以进一步承载，直至纤维断裂，这时复合材料的断裂强度为

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f \quad (1-31)$$

同样的方法，可以得到控制复合材料断裂所需的最小纤维体积分数（当基体断裂应变小于纤维断裂应变时，基体开裂后，纤维能承担因基体卸荷而转移给它的荷载而不使复合材料承载能力下降的最小纤维体积率）为

$$V_{min} = \frac{\sigma_{mu}}{\sigma_{fu} + \sigma_{mu} - \sigma_f^*} \quad (1-32)$$

1.3.2.2 横向刚度和强度预报

(1) Halpin-Tsai 公式。Halpin 和 Tsai 为分析纤维增强复合材料横向弹性模量严格的微观力学关系，提出了复合材料横向弹性模量 E_T 的公式：

$$E_T = \frac{(1 + \xi \eta V_f)}{(1 - \eta V_f)}, \quad (1-33)$$

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi} \quad (1-34)$$

式中， ξ 是与纤维几何、堆积几何及载荷条件有关的参数，可以通过公式与严格的数学解对比得到。Halpin-Tsai 提出纤维截面为圆形和正方形时 ξ 等于 2，为矩形纤维时为 $2a/b$ 。 a/b 是矩形截面尺寸比， a 处于加载方向。

Halpin-Tsai 公式适于预测实际复合材料的横向弹性模量，由于复合材料工艺过程的不同会引起材料弹性模量的波动，因此很难准确预测复合材料弹性模量。

(2) 横向强度。与纵向强度不同的是，纤维对横向强度不仅没有增强作用，甚至可能产生不利作用。纤维在与其相邻的基体中所引起的应力和应变中将对基体形成约束，使得复合材料的断裂应变比未增强基体低得多。

假设复合材料横向强度 σ_t 受基体强度 σ_{mu} 控制，同时可以用一个强度衰减因子 S 来表示复合材料强度的降低，那么这个因子与纤维、基体性能及纤维体积分数有关。

按传统材料强度方法，可以认为因子 S 就是应力集中系数 S_{CF} 或应变集中系数 S_{MF} 。如果忽略泊松效应， S_{CF} 和 S_{MF} 分别为

$$S_{CF} = \frac{1 - V_f \left(1 - \frac{E_f}{E_m}\right)}{1 - \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right) \sqrt{\frac{4V_f}{\pi}}}, \quad (1-35)$$

$$S_{MF} = \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{4V_f}{\pi}} \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)}. \quad (1-36)$$

若已知 S_{CF} 和 S_{MF} ，则可用应力或应变表示横向强度。

使用现代方法，通过对复合材料应力或应变状态的了解可以计算得到 S 。可以用一个适当的断裂判据来确定基体的断裂，一般使用最大形变能判据，即当任何一点的形变能达到临界值时，材料发生断裂。按照这个判据， S 可以写作