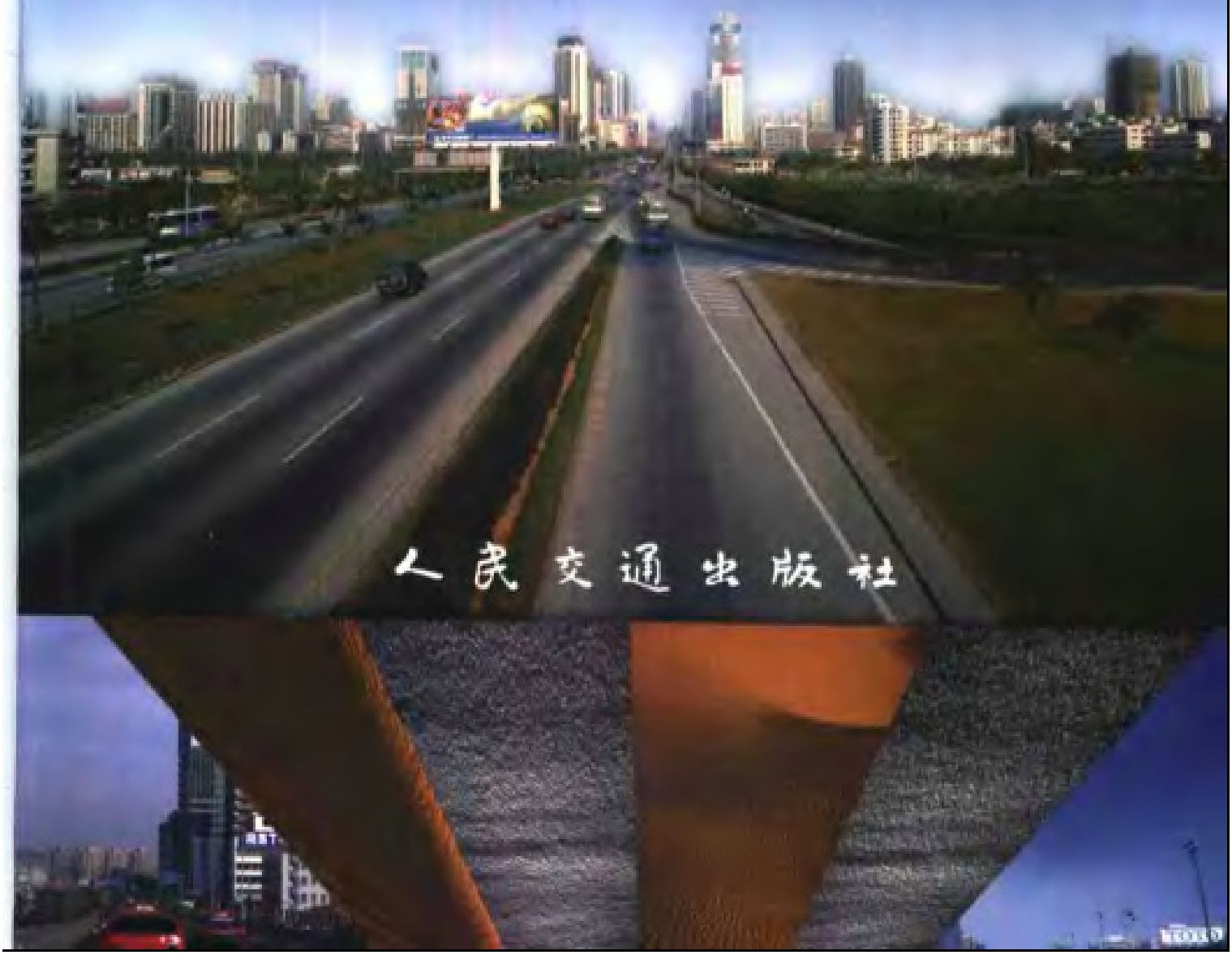
高等学校试用教材

道路复合材料

（交通土建工程专业用）

肖桂彰　主编
郑传超　主审



人民交通出版社

高等学校试用教材

Daolu Fuhe Cailiao
道路复合材料

（交通土建工程专业用）

肖桂彰　主编
郑传超　主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以路基路面应用的复合材料为主体，全面阐述了道路复合材料的基本性质、增强机理、力学分析、试验研究方法，结合道路工程实际，介绍了常见道路复合材料的基本组成、施工工艺、技术性能和工程设计等。全书共分六章，内容包括复合材料基础、复合材料基本力学性能、钢纤维混凝土、土工合成材料、其它道路复合材料及复合材料试验研究方法等。

《道路复合材料》教材是根据1996年11月在西安召开的高等学校路桥及交通工程专业教学指导委员会（一届二次）会议审议修订的编写大纲编写的。本书可作为高等学校土木类路桥专业研究生教学用书，也可供土木类工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

道路复合材料/肖佳彰编著. 北京:人民交通出版社,1999
ISBN 7-114-03252-8

Ⅰ.道… Ⅱ.肖… Ⅲ.道路工程-建筑材料:复合材料
Ⅳ.U414

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第03914号

高等学校试用教材
道路复合材料
(交通土建工程专业用)
肖佳彰 主编
郑传超 主审
责任印制:张凯 版式设计:周 园 责任校对:张 捷
人民交通出版社出版
(100013 北京和平里东街10号)
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经销
北京鑫正大印刷厂印刷
开本:787×1092 1/16 印张:8.75 字数:210千
1999年6月 第1版
1999年6月 第1版 第1次印刷
印数 0001-4000册 定价 12.00元
ISBN 7-114-03252-8
U·02316

前　言

随着公路事业的蓬勃发展，对公路建设所用材料也提出了更新、更高的要求。复合材料就是近二、三十年出现的新型材料之一。60年代以来，在北美、东欧等各国进行了积极开发，从理论研究到工程实际均取得了很大成绩。我国近十几年也开始从事这方面的研究和应用，取得了不少成果。复合材料在道路工程中的应用，大大改善和提高了传统工程材料的性能，对提高路面的使用品质起了重要作用。

为拓宽土木类专业学生的知识面，便于工程中正确选择和应用复合材料，我们根据国内外文献、资料及国内最新研究成果，将道路中所用复合材料的基本知识和基本理论及试验方法系统化，首次编写了这本教材。教材以原乔明俊教授主编的交通部内部教材《复合材料》为蓝本，通过几年的研究生教学实践，结合路桥专业具体情况，对原有体系进行了较大修改。本书着重介绍道路中所用复合材料的组成、特性和机理，同时适当地介绍了有关的力学分析方法。

本教材由长沙交通学院路桥工程系编写，共六章。第一章由肖桂彰、姚佳良合编，第二章由胡步趋编写，第三章由肖桂彰编写，第四章由周志刚编写，第五章、第六章由姚佳良编写。在编写过程中，教材主编乔明俊教授因病不幸去世，使我们的编写工作蒙受了很大损失，幸得张起森教授大力帮助，从编写大纲到编写内容都提出了很多宝贵的指导性意见，使编写工作得以顺利开展。同时，在编写过程中还得到郑建龙教授及蔡文辉老师的大力支持和帮助，在此一并致谢。

限于编者水平，书中缺点、错误难免，敬请有关专家和广大读者批评指正。

编　者

1998. 7

目　录

第一章　复合材料基础 …… 1
第一节　概述 …… 1
一、复合材料概念 …… 1
二、复合材料分类 …… 1
三、复合材料特性 …… 2
第二节　复合材料强化理论 …… 3
一、粒子改性复合材料 …… 3
二、纤维增强复合材料 …… 5
三、层状复合材料 …… 12
第三节　复合材料力学分析与设计的特点 …… 13
一、复合材料应用设计方法 …… 13
二、复合材料力学性能 …… 14
三、复合材料力学分析方法的分类与应用范围 …… 14
第四节　常见道路复合材料 …… 15
一、钢纤维混凝土 …… 15
二、土工合成材料 …… 15
三、水泥沥青混凝土 …… 15
四、玻璃纤维增强水泥 …… 15
五、聚合物水泥混凝土 …… 15
六、短纤维沥青混凝土 …… 16
第二章　道路复合材料的基本力学性能 …… 17
第一节　复合材料的弹性特性 …… 17
一、单向复合材料的宏观弹性特性 …… 17
二、单向复合材料弹性常数的微观力学分析 …… 20
三、复合材料弹性系数间的约束关系 …… 27
第二节　复合材料的强度准则 …… 28
一、概述 …… 28
二、常用的复合材料强度准则 …… 28
第三节　复合材料的损伤及分析 …… 32
一、复合材料损伤与损伤特征 …… 33
二、复合材料疲劳损伤 …… 34
三、复合材料统计损伤模型 …… 35
第四节　短切纤维复合材料 …… 37
一、应力传递理论 …… 37

二、复合材料的等效弹性模量 …… 43
三、短纤维复合材料的强度预报 …… 48
第三章 钢纤维混凝土 …… 50
第一节 概述 …… 50
一、钢纤维混凝土的一般特性 …… 50
二、钢纤维混凝土的增强机理 …… 52
第二节 钢纤维混凝土的性能 …… 57
一、钢纤维混凝土的力学性能 …… 57
二、钢纤维混凝土的界面性能 …… 60
第三节 钢纤维混凝土的设计应用 …… 62
一、钢纤维混凝土的组成材料 …… 62
二、道路用钢纤维混凝土的组成设计 …… 64
三、钢纤维混凝土的施工 …… 66
四、钢纤维混凝土在道路工程中的应用 …… 67
第四章 土工合成材料 …… 69
第一节 土工合成材料的基本概念 …… 69
一、土工合成材料种类 …… 69
二、土工织物 …… 69
三、土工膜 …… 69
四、特种土工合成材料 …… 70
五、复合型土工合成材料 …… 71
第二节 土工合成材料的工程特性 …… 71
一、物理特性 …… 71
二、力学特性 …… 72
三、土工合成材料与土相互作用时的界面摩擦特性 …… 74
四、水力学特性 …… 75
五、耐久性 …… 76
第三节 土工合成材料的工程应用 …… 77
一、土工合成材料的功能及适用范围 …… 77
二、土工合成材料的工程应用 …… 78
第五章 其它道路复合材料 …… 84
第一节 水泥沥青混凝土 …… 84
一、原材料选择 …… 84
二、施工工艺 …… 85
三、水泥沥青混凝土的技术性能 …… 85
四、水泥沥青混凝土的结构 …… 87
第二节 聚合物水泥混凝土 …… 87
一、聚合物概述 …… 87
二、原材料选择 …… 92
三、配合比设计与施工工艺 …… 94

四、聚合物混凝土的技术性能 …… 96
第三节 玻璃纤维混凝土 …… 97
一、原材料选择 …… 97
二、配合比选择 …… 98
三、玻璃纤维混凝土的成型工艺 …… 99
四、玻璃纤维混凝土技术性能 …… 99
第四节 改性沥青 …… 100
一、橡胶类改性沥青 …… 100
二、热塑性树脂类改性沥青 …… 101
三、热塑性弹性体改性沥青 …… 101
四、碳黑改性沥青 …… 102
五、纤维类改性沥青 …… 104
六、微填料类改性沥青 …… 105
第六章 复合材料试验研究方法 …… 106
第一节 试验方法总则 …… 106
一、试验方法分类 …… 106
二、试样的结构和形态 …… 106
三、进行测试时的环境条件和试样的状态调节 …… 106
四、试件的制备 …… 107
五、试验时的加载速度 …… 107
六、取样、计算和报告 …… 107
第二节 物理性能测定 …… 108
一、相对密度测定 …… 108
二、纤维百分含量测试 …… 109
三、土工织物孔径试验 …… 110
四、钢纤维混凝土干缩试验 …… 112
第三节 静态力学性能测试 …… 113
一、拉伸性能测试 …… 113
二、压缩性能测试 …… 115
三、剪切性能测试 …… 118
四、弯曲性能测试 …… 120
五、钢纤维混凝土与钢筋粘结强度试验 …… 122
六、土工膜的渗透特性 …… 123
七、土工织物、土工膜的 CBR 顶破试验 …… 124
八、疲劳试验 …… 125
第四节 耐久性试验 …… 126
一、钢纤维混凝土的抗冻性试验 …… 126
二、耐磨性试验 …… 127
参考书目录 …… 129

第一章　复合材料基础

第一节　概　　述

一、复合材料概念

两种或两种以上不同化学性质或不同组织的物体，以微观或宏观的形式结合而成的材料，称为复合材料。复合材料是多相材料，主要包括基体相和增强相。基体相是一种连续相材料，它把改善性能的增强相材料固结成一体，并起传递应力的作用；增强相起承受应力（结构复合材料）和显示功能（功能复合材料）的作用。

复合材料实际上存在于自然界中，并早已被广泛应用。例如，木材就是由占总体积95%以上的长纤维（其长径比大于100以上）和少量取向混乱的微纤维以及与之键合的木质素所构成的复合物，其纵向强度比横向或径向强度要大25至50倍；钢筋混凝土则是钢筋和砂、石、水泥的人工复合材料。近代复合材料最早有玻璃纤维增强热固性树脂等。随着原子能、航空、宇航、电子、化工等工业的发展，除要求材料有高强度、高模量、耐高温、低密度外，还对材料的韧性、耐磨、耐腐蚀等提出了特殊要求，因而发展了复合技术。现代复合材料始于20世纪40年代初，是有机高分子、无机非金属或金属等几种不同材料，通过复合工艺组合而成的新型材料。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。

二、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）的形状可分为三类：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。

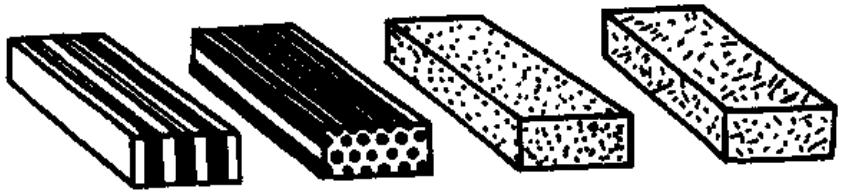


图1-1　复合材料结构示意图

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

三、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。

（一）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）。

（二）抗疲劳性能好

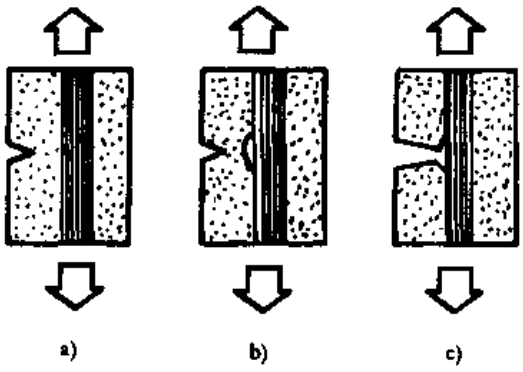


图 1-2　复合材料中疲劳裂纹扩展示意图

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%。

（三）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。

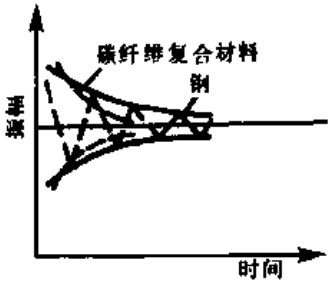


图 1-3　两种材料的阻尼特性的比较

（四）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较高的高温强度。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 30μm、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。

（五）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，性能上既保留有各自的优点，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。

第二节　复合材料强化理论

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，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：

一、粒子改性复合材料

（一）粒子改性复合材料增强机理

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，粗大颗粒的加入主要是为了获得一种综合性能。现就细粒增强复合材料的增强机理说明如下：

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。

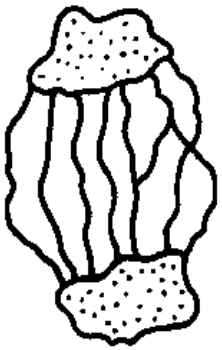


图 1-4　粒状填料增强机理

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，因而提高了试样的强度。

（二）复合材料性能的估算

复合材料某些性能可用混合律来分析。根据复合材料各成分体积和性能估算复合材料性能的计算方法，称为混合律。

颗粒状复合材料的某些性能只取决于各组成物质的相对数量及性能，此时可用混合律来

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：

$$\rho_c = \sum f_i \rho_i = f_1\rho_1 + f_2\rho_2 + \cdots + f_n\rho_n \tag{1-1}$$

式中：ρ_c——复合材料的密度；

ρ_i——复合材料中各成分的密度；

f_i——每种组成物质的体积份额。

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：

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

式中下标 p、m 分别代表增强粒子和基体，f 表示体积份额。

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：

$f_{Tic}=0.349$　　$f_{Tac}=0.04$　　$f_{co}=0.064$

由混合规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，…，P_n）（%）；各种矿料的密度（γ_1，γ_2，…，γ_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℃）。试求沥青混合料试件的理论密度（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：

$$f_1 = \frac{P'_1/\gamma_1}{P'_1/\gamma_1 + \cdots + P'_n/\gamma_n + P_b/\gamma_b}$$

$$f_n = \frac{P'_n/\gamma_n}{P'_1/\gamma_1 + \cdots + P'_n/\gamma_n + P_b/\gamma_b}$$

$$f_b = \frac{P_b/\gamma_b}{P'_1/\gamma_1 + \cdots + P'_n/\gamma_n + P_b/\gamma_b}$$

由混合律可得沥青混合料的密度为：

$$\rho'_t = \sum f_i\rho_i = \frac{100}{P'_1/\gamma_1 + \cdots + P'_n/\gamma_n + P_b/\gamma_b}$$

则相对于水的密度为：

$$\rho_t = \rho'_t\rho_w = \frac{100}{P'_1/\gamma_1 + \cdots + P'_n/\gamma_n + P_b/\gamma_b}\rho_w$$

（三）粒子改性复合材料性能的影响因素

影响粒子增强效果的因素有：粒子在复合材料中所占的体积百分数、分布的均匀程度、粒子直径、间距、增强粒子的性质、基体性质和基体与增强粒子化学相容性、稳定性、增强粒子与基体粒径比等因素。常见增强粒子的化学成分与形态见表 1-1。

常用填料化学成分与形态表 表 1-1

填料名称	相对密度	颗粒形状	颗 粒 度（μm）	化 学 成 分
轻质碳酸钙	2.75	针状结晶	3～10 占 88%	$CaCO_3$>98.5%
重质碳酸钙	2.65	不规则块状	3～10 占 55%	$CaCO_3$>95%
硫酸钙	2.94	圆柱状结晶	3～10 占 25%	$CaSO_4$ 占 57%
亚硫酸钙	2.59	柱状结晶	3～10 占 77%	$CaSO_3$>97%
滑石粉	2.74	不规则块状	3～10 占 33%	3Mg、$4SiO_2$、H_2O
菱苦土	2.9	不规则块状	3～10 占 60%	$MgCO_3$占 60%
二氧化钛	3.84	球状结晶	在 0.1 以下	TiO_2 占 97%
硫酸污泥	5.12	不规则块状	10 以上	Fe_2O_3 占 40%～50% CaO 占 20%～30% SiO_2 占 10%
云母	2.7～3.1	片状	20～60000	KAl（AeSiO）（OH）
高岭土	2.58～2.63	不规则块状	6.9～3.0	SiO_2 占 40%～50% Al_2O_3 占 30%～40%
二氧化硅	1.95～2.66	块状		SiO_2 99.5%
碳黑	1.8～2.1	块状	0.02	C 70%～80%
粉煤灰	2.0～2.4	球状	100	SiO_2 61.17% Al_2O_3 21.45% CaO 3.77%
玻璃微球	0.4～2.48	球状	100	SiO_2 72% Na_2O（K_2O）14% CaO 8%，MgO 4%

二、纤维增强复合材料

近 30 年来，纤维复合材料得到了广泛的应用，如在道路、桥梁、建筑工程中应用纤维复合材料的实例已屡见不鲜。有用复合材料与常规材料构成的组合结构，也有用复合材料加固旧有结构的情况。特别是短切纤维增强水泥混凝土，在公路、桥梁、地下工程、水工建筑等方面应用非常广泛，尤其是公路路面、机场跑道。

（一）纤维增强复合材料增强机理

纤维增强复合材料是指以各种金属与非金属材料作基体，以各种纤维作分散质的复合材料。按基体原材料不同，分为纤维增强塑料、纤维增强橡胶、纤维增强金属及纤维增强陶瓷。纤维增强陶瓷实际上不仅是陶瓷而且包括耐火材料、混凝土、水泥、玻璃等。在结构复合材料中，纤维是主要承载成分，起骨架作用；基体起粘结纤维和传递力的作用。因而纤维的性能、纤维在基体中的含量、分布及纤维与基体的粘结力等对复合材料的力学性能影响极大。

1. 纤维获得强化的原因

第一，纤维是具有强结合键的物质或硬质材料（例如陶瓷、玻璃等），它们多在周期表的

中间部分，如碳、铝、硅、氮、氧等所形成的化合物 Al_2O_3、SiC、SiO_2 等。在这些材料表面上如有一个微小的伤痕，或者内部存在一条微裂纹，都足以造成断裂。一块体积较大的材料不可能没有缺陷，或者在使用过程中总会形成损伤，因而表现出很大的脆性。这种对裂纹的敏感性，使材料不可能达到其应有的理论强度。但是，如将它们制成很细的纤维，其有用的强度将会大大地增加。例如，玻璃很脆，一有划伤，将立即断裂，但如制成极细的纤维，强度可高达 3000MPa，为普通钢材的 6 倍。纤维强度升高的原因是统计的结果，即试样的临界裂纹尺寸（裂纹开始迅速扩展所必须的裂纹尺寸）随着纤维本身直径的减小而相对地增大。或者说，裂纹临界尺寸与纤维直径之比，随着纤维变细而增大。

第二，纤维处于基体之中，彼此隔离，表面得到基体的保护，不易遭受损伤；也难在受载过程中产生裂纹，使承载能力增大。

第三，在不均匀的三向应力状态下，即使是脆性组成，也能表现出明显的塑性。例如，钢在塑性变形时，其中的渗碳体即能随之发生较大的变形。复合材料受力时纤维的力学行为也是如此。

2. 复合材料增强机理

纤维增强复合材料的机理至今还处于研究之中。当前具有代表性的理论基本上有两个，一为“纤维间距理论”，或称“阻裂理论”，系根据线性弹性断裂力学，提出了纤维阻止脆性基体中裂缝扩展的作用；另一个为“复合理论”，即以“混合律”为依据，其性能是纤维和基体两者性能的叠合值。

纤维间距理论按照断裂力学的观点，材料的抗拉强度主要取决于其内部存在的裂缝与缺陷的大小，当脆性基体中均匀分布了纤维之后，裂缝扩展到纤维与基体界面时，界面上产生的剪应力对裂纹扩展起约束作用，也就是纤维阻止了裂缝的扩展，故假设裂缝长度接近于纤维间距时，根据格里菲斯的基本公式提出了纤维增强脆性基体的初裂强度 σ（刚出现可见裂缝时的强度）公式为：

$$\sigma = \frac{K_c}{B\sqrt{\bar{S}}} \tag{1-3}$$

式中：K_c——纤维复合材料的断裂韧性（$kN/mm^{1.5}$）；

$\bar{S}$——纤维平均间距（mm）；

B——常数。

其中

$$\bar{S} = K\frac{d_f}{\sqrt{V_f}} \tag{1-4}$$

式中：d_f——纤维直径（mm）；

V_f——纤维体积率（%）；

K——与纤维排列方向有关的系数，一维定向时（纤维单向排列且受力方向一致时），$K=0.85$；二维乱向时（纤维在平面上杂乱排列时），$K=1.11$；三维乱向时（纤维在空间内杂乱排列时），$K=1.38$。

从式（1-3）中可知纤维增强材料的初裂强度 σ 与 $\sqrt{\bar{S}}$ 成反比，也就是说，纤维平均间距越小，初裂强度越高。

纤维增强复合材料中纤维的含量存在一临界值，当实际纤维含量大于此临界值时，才有

明显的增强作用，纤维含量若低于此临界值，增强作用不明显，甚至还会降低基体的强度。纤维含量的临界值是以纤维体积率表示的，可按下式计算：

$$V_c = \frac{\sigma_{mu}}{\sigma_{fu} + \sigma_{mu} - E_f\varepsilon_{mu}} \tag{1-5}$$

式中：V_c——临界纤维体积率（%）；

ε_{mu}——基体的极限延伸率；

σ_{mu}，σ_{fu}——分别为基体、纤维的抗拉极限强度（MPa）；

E_f——纤维的弹性模量（MPa）。

（二）复合材料性能指标估算

1. 纤维复合材料的密度

$$\rho_c = \rho_m f_m + \rho_f f_f \tag{1-6}$$

2. 纤维复合材料的强度及弹性模量

单向复合材料的强度和模量，可采用理论和半经验的方法确定，也可采用实验方法确定。按理论方法确定时，对于单向纤维增强复合材料，假设整个复合材料中纤维的性质和直径都是均匀的而且是平行连续排列，其强度和弹性模量的推导过程如下。

1）外力与纤维轴平行时

假设纤维与基体间为理想粘结，若界面不发生滑移（呈刚性结合），则在外力作用下纤维与基体处于等应变条件，即

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \tag{1-7}$$

作用在材料上的力是纤维、基体受力的总和，即

$$F_c = F_m + F_f \tag{1-8}$$

式中下标 c、m、f 分别代表复合材料、基体和纤维。如果纤维和基体呈现弹性变形，根据虎克定律，$\sigma=\varepsilon E$，则应力为：

$$\sigma_f = E_f\varepsilon_f \tag{1-9}$$

$$\sigma_m = E_m\varepsilon_m \tag{1-10}$$

应力 σ_f 和 σ_m 分别作用在纤维的整个横截面 A_f 和基体的整个横截面 A_m 上，因而纤维和基体所传递的荷载 F_f 和 F_m 为：

$$F_f = \sigma_f A_f = E_f\varepsilon_f A_f \tag{1-11}$$

$$F_m = \sigma_m A_m = E_m\varepsilon_m A_m \tag{1-12}$$

总荷载作用于复合材料整个横截面（横截面面积为 A_c）上，则

$$F_c = \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \tag{1-13}$$

$$\sigma_c = \sigma_f \frac{A_f}{A_c} + \sigma_m \frac{A_m}{A_c} \tag{1-14}$$

纤维的体积百分数可用面积百分数表示（因为是等横截面），即

$$f_f = \frac{A_f}{A_c} \qquad f_m = \frac{A_m}{A_c} \tag{1-15}$$

因此

$$\sigma_c = \sigma_f f_f + \sigma_m f_m \tag{1-16}$$

复合材料实际强度由于受纤维和基体之间的结合程度、基体变形和长度的影响，其值几乎总是小于由混合律所预测的值。

复合材料弹性模量的混合律可由式（1-13）推出，分别用 ε_c、ε_f、ε_m 表示，除式（1-13）各项，则

$$\sigma_c/\varepsilon_c = \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} f_f + \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} f_m$$

$$E_c = E_f f_f + E_m f_m \tag{1-17}$$

外力很大时，基体材料开始变形，致使复合材料的应力—应变曲线偏离线性，这时，其弹性模量不再符合混合律。由于基体对复合材料刚性贡献较小，模量可近似表示为

$$E_c = E_f f_f \tag{1-18}$$

此外，复合材料的模量仅取决于纤维。纤维增强复合材料的应力应变曲线见图 1-5。在低应力下，弹性模量服从混合律，在较高应力下，基体变形，因此不再符合混合律。几种复合材料的力学性能见图 1-6。

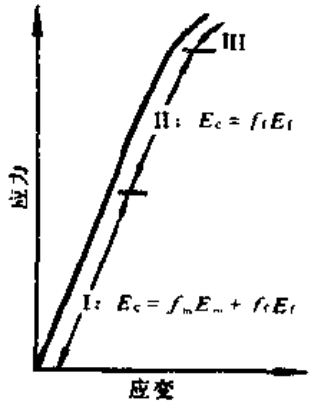


图 1-5　纤维增强复合材料的应力—应变曲线

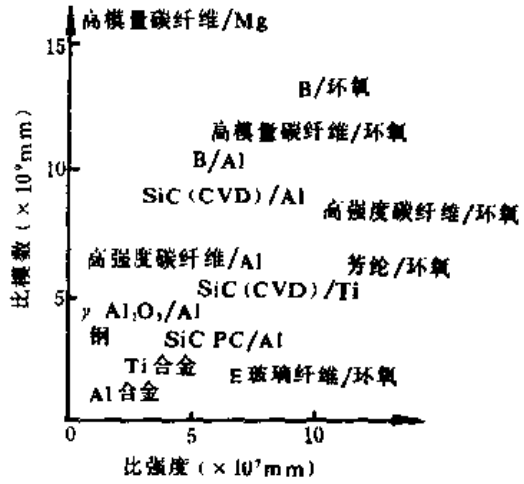


图 1-6　几种复合材料的力学性能

2）外力与纤维轴垂直时

此时材料中每种成分的应变量不等，总应变量等于各成分应变量与体积百分数的乘积，而每一成分受到的应力是相等的。

$$\varepsilon_c = f_m \varepsilon_m - f_f \varepsilon_f$$

$$\sigma_c/E_c = f_m(\sigma_m/E_m) + f_f(\sigma_f/E_f)$$

因为

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$$

所以

$$\frac{1}{E_c} = \frac{f_m}{E_m} + \frac{f_f}{E_f} \tag{1-19}$$

3. 纤维复合材料的导热性、导电性

$$K_c = f_m K_m + f_f K_f \tag{1-20}$$

$$\gamma_c = f_m \gamma_m + f_f \gamma_f \tag{1-21}$$

式中：K_c 为导热系数，γ_c 为电导。

按照微观力学理论，考虑纤维长度、纤维最小体积比后，混合律预估强度及模量的修正公式以及乱向短纤维强度和模量的预估公式见本书第二章。

例题 1-3

含 40%（体积）纤维的碳化硅涂层硼纤维增强铝是一种重要的耐高温、轻质复合材料。试估算其密度、平行于纤维轴的弹性模量和强度以及垂直于纤维方向的弹性模量。

每一组元（成分）的性质如下：

材料	密度 (g/cm^3)	剪切弹性模量 (MPa)	拉伸强度 (MPa)
纤维	2.36	379214	2760
铝	2.70	68948	34

解：

由混合律可得：

$$\rho_c = 0.6 \times 2.7 + 0.4 \times 2.36 = 2.56 g/cm^3$$

$$E_c = 0.4 \times 379214 + 0.6 \times 68948 = 193054 MPa$$

$$T_u = 0.4 \times 2760 + 0.6 \times 34 = 1124 MPa$$

当应力垂直于纤维时

$$\frac{1}{E_c} = \frac{0.6}{68948} + \frac{0.4}{379214} = 0.97 \times 10^{-6} \qquad E_c = 1.03 MPa$$

图 1-7 为平行于纤维的实际弹性模量及强度。计算出的弹性模量为 193054MPa，与测量值完全相同；然而估算出的强度为 1124MPa，远高于实际值（大约为 896MPa）。

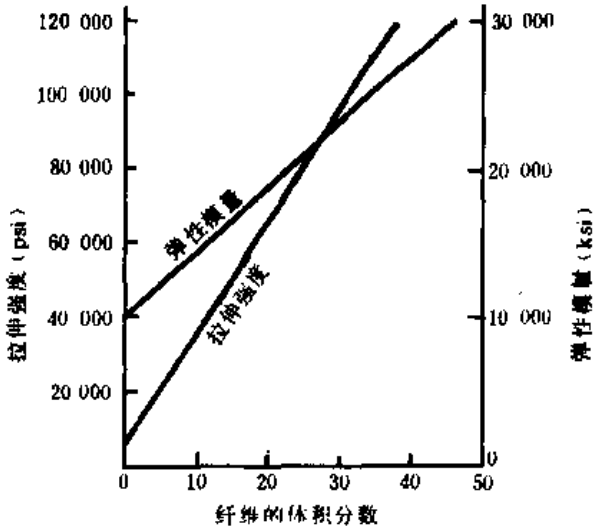


图 1-7　碳化硅涂层硼纤维的体积百分数对碳化硅涂层硼纤维增强铝的性能影响

（三）纤维增强复合材料性能的影响因素

1. 纤维的长径比（细长比）

用做增强剂的纤维有短纤维、长纤维或连续纤维。l 为纤维长度，d 为纤维的直径，l/d 为长径比。长径比大时增强效果好，因为纤维的直径越小，其表面积越小，由表面缺陷（裂缝）引起的脆性断裂亦相应减少。此外，由于纤维末端承载力较小，所以短纤维不如长纤维增强效果好。如碳纤维增强尼龙，当纤维的 $l/d=30$ 时，抗张强度为 110MPa；当 $l/d=800$ 时，抗张强度可达 240MPa。从加工性能考虑，短纤维易于与基体混合。综合考虑，实际生产中常常采用长径比大于某临界值的不连续纤维。

2. 纤维的体积百分数

纤维的体积百分数越大，复合材料的强度和刚度也越大，其上限大约是80%，这取决于基体材料包围纤维的能力。

3. 纤维的取向

当纤维无规则排列时，能获得基本各向同性的复合材料，但力学性能不是最佳。如均为一维方向的纤维，材料有明显的各向异性，在沿纤维方向具有最佳的刚性和强度，但在垂直方向则非常差，见图1-8。

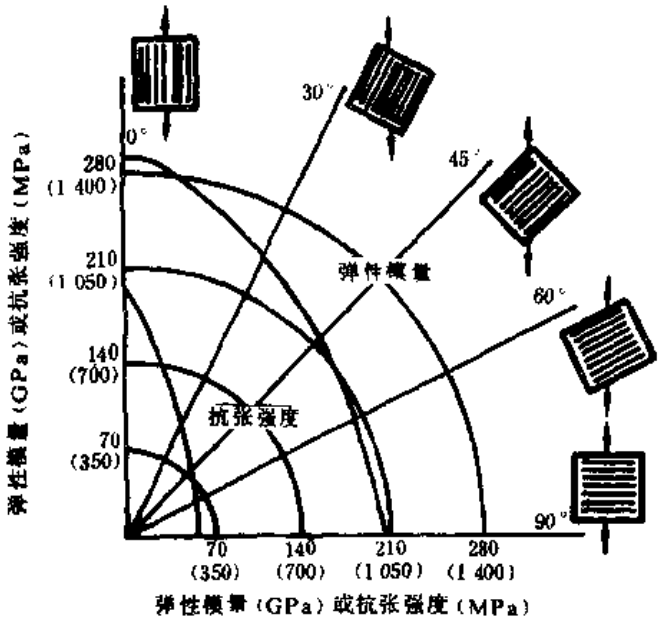


图1-8 硼纤维增强钛合金复合材料中纤维排列方向对性能的影响

当纤维采用正交编织时，相互垂直的方向均具有好的强度，见图1-9a)；当采用三维编织方法时，可获得各个方向力学性能均优的复合材料，见图1-9c)；纤维也可按30°或45°角排布，以满足各种应力情况，见图1-9b)。

4. 纤维的性能

纤维材料应当有高强度、高刚度、轻质及高熔点的优点。人们总是愿意选择高比模量及高比强度的材料来制作纤维。表1-2为某些纤维的典型数据。从表1-2可知，象石墨及硼这样一些低原子序数及共价键的材料具有最高的比模量，这两种材料也具有高强度及高熔点。但是，由于这些材料太脆，也太活泼，不宜于单独使用，只能用于复合材料中。

5. 基体性能

基体必须满足与增强纤维间的化学相容性、制造过程中与纤维间的相容性以及使用中对环境的稳定性。基体材料一般都具有韧性和延性，它可将荷载传送给纤维并且能使断裂纤维的裂纹不至于扩展到整个复合材料中。基体也应当有一定的强度，这样就会增强整体复合材料的性能。基体对复合材料的力学作用主要表现在层间剪切强度方面；也表现在高温下的抗压缩性能和抗弯性能方面。最后，熔点也会影响基体的性能。聚合物的最高使用温度，聚酯为80℃，聚酰亚胺树脂为315℃。金属材料可在更高温度下使用。

6. 纤维与基体之间的界面强度

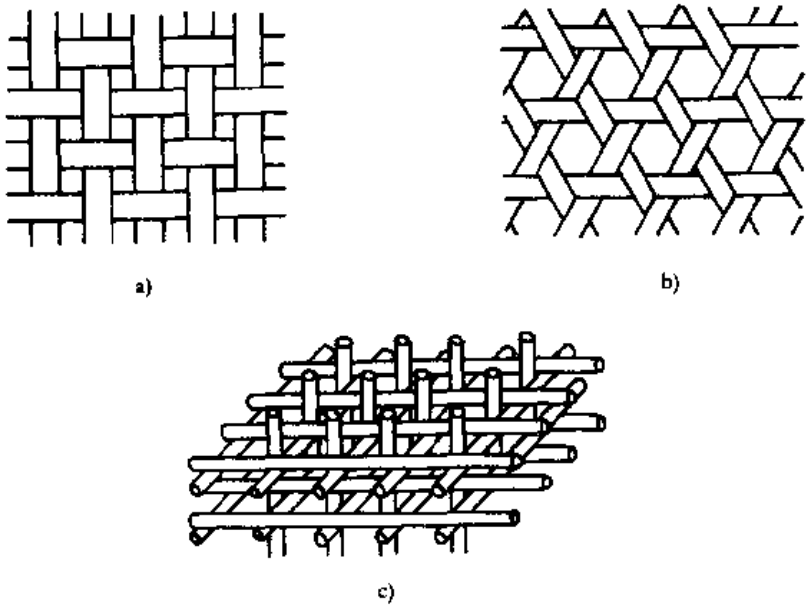


图 1-9　纤维编织的三种方法

a）双轴编织；b）三轴编织；c）三维编织

几种纤维增强材料的性能　　表 1-2

材　料	密　度 (g/cm^3)	拉伸强度 (MPa)	弹性模量 ($\times 10^3$MPa)	熔点 (℃)	比　模　量 ($\times 10^6$)	比　强　度 ($\times 10^7$)
E 玻璃	2.55	3448	72	<1725	29	14.22
S 玻璃	2.50	4482	87	<1725	36	18.29
SiO_2	2.19	5862	72	1728	34	27.43
Al_2O_3	3.15	2069	172	2015	56	6.6
ZrO	4.84	2069	345	2677	73	4.32
高强度石墨 HS	4.84	2758	276	3700	188	18.80
高模量石墨 HM	1.50	1862	531	3700	363	12.7
BN	1.90	1379	89	2730	48	7.37
硼	2.36	3448	379	2030	164	11.94
BC	2.36	2275	483	2450	209	9.91
SiC	4.09	2069	483	2700	120	5.08
TiB	4.84	103	510	2980	116	0.25
Be	1.83	1276	303	1277	197	7.11

复合材料在力场中，除增强剂和基体受力外，界面也起重要作用。在制造复合材料的过程中，自由纤维与基体形成一体，纤维的表面转换成完全湿润、能传递应力的界面。外力场只有通过界面才能使增强剂和基体二相起到协同作用，因而界面是影响复合材料性能的关键之一。界面性能可由界面强度（结合强度）来反映，因为结合强度高，不仅直接有利于整个材料的强度，更重要的是便于将基体所受的荷载传递给纤维，以充分发挥其增强作用。结合强度过低时，界面很难传递荷载，纤维无法起增强作用，使整体强度大大降低。过高的结合强度也不利，它会使材料断裂时失去纤维从基体中拔出的过程，降低强度并导致危险的脆性断裂。

复合材料中的界面并非单纯的几何面，而是一个多层结构的过渡区，见图 1-10。界面区由五个亚层组成，其性能与基体及增强剂的性质、偶联剂的品种、复合材料的成型方法等密

切相关。界面的结合强度主要决定于纤维与基体表面结合的性质和纤维的表面状态。为了提高界面的结合强度，可以对纤维进行表面处理，增加表面的粗糙度，或表面形成活性基团。例如，采用表面氧化法处理碳纤维，在60%的硝酸中浸泡24h后，可使面积由1mm²/g增加至36mm²/g，同时增加了表面羧基的数量。结果使碳纤维增强环氧树脂的强度提高了很多，见表1-3。可以在纤维表面涂偶联剂，偶联剂具有双亲基团，它一端与纤维成键，另一端与基体成键，使纤维和基体之间产生较强的化学结合。

硝酸处理对碳纤维环氧树脂强度性能的影响 表1-3

处理方法（煮沸24h）	剪切强度（MPa）		纵向拉伸弹性模量
	弯曲	扭转	（MPa）
未处理	22.7	26.8	3430
60%硝酸	>42.7	50.1	3160
70%硝酸	23.3	—	1920

关于纤维复合材料的力学分析见本书第二章有关内容。

三、层状复合材料

（一）层状复合材料增强机理

层状复合材料是由两层及两层以上的不同材料胶合而成的。层状复合材料可分为两类：一类是加层板，另一类是夹芯结构。使用层状复合材料可以使材料的许多性能增强，如提高强度、刚度、耐腐蚀性、耐磨性、绝热性与隔音性等，同时还使材料美观或质轻。层合材料能改善性能是层状复合材料中的每个组份层的最优性能组合起来的结果。至于层状复合材料能提高刚度，我们可以从以下两个结构说明。

图1-11为两个结构形式不同的梁，假定所承受的弯矩相等，即$M_1=M_2$；所用的材料相同，即$E_1=E_2$；但截面不同，则

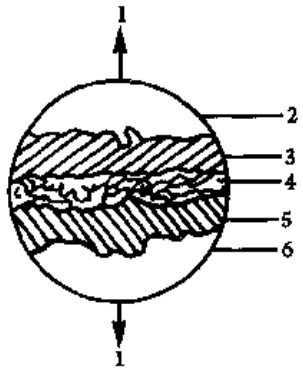


图1-10 界面区示意图
1-外力场；2-基体；3-基体表面区；4-相互渗透区；5-增强剂表面区；6-增强剂本体

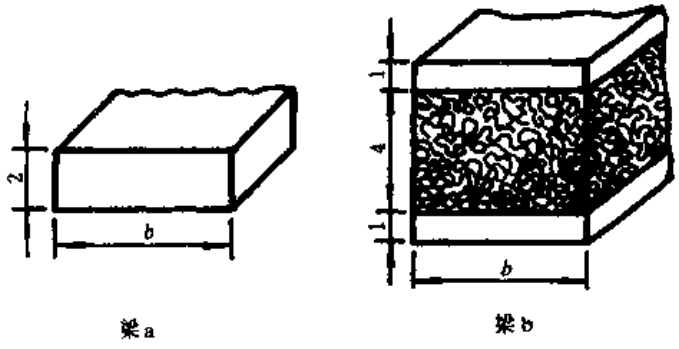


图1-11 梁a与梁b的垂直截面示意图

根据材料力学，梁中性层曲率（$1/\rho$）公式：

$$1/\rho = M/EI_Z \tag{1-22}$$

式中：ρ——曲率半径；

I_Z——绕中性层的转动惯量；

M——梁所承受的弯矩；

E——梁的弹性模量。

将 M_1、M_2、E_1、E_2、I_{Z1}、I_{Z2}代入式（1-22）可得

$$\rho_1/\rho_2 = 1/19$$

也就是说，如将一个平板梁按其厚度之半锯开，中间填充一个夹层，并令其承受的弯矩与未曾锯开的梁所承受的弯矩相等，则此时即使忽略夹层的抗弯能力，层状复合后其抗弯能力也能提高 18 倍。

层状复合材料增强效果与表面材料、芯材、胶结料性能密切相关。

（二）复合材料性能指标估算

层状复合材料具有各向异性，沿薄层水平方向与垂直方向的性能差异较大，混合律有不同的表达式：

1. 水平方向

密　　度　　$\rho_c = \sum f_i \rho_i$　　(1-23)

电　　导　　$\gamma_c = \sum f_i \gamma_i$　　(1-24)

导热系数　　$K_c = \sum f_i K_i$　　(1-25)

弹性模量　　$E_c = \sum f_i E_i$　　(1-26)

2. 垂直方向

电　　导　　$1/\gamma_c = \sum (f_i/\gamma_i)$　　(1-27)

导热系数　　$1/K = \sum (f_i/K_i)$　　(1-28)

弹性模量　　$1/E_c = \sum (f_i/E_i)$　　(1-29)

其他性质如抗腐蚀性、抗磨性等主要与复合材料的成分有关，不能用混合律计算。

第三节　复合材料力学分析与设计的特点

一、复合材料应用设计方法

1. 等代设计法 (Direct Substitution)。它是将复合材料当成常规材料的简单代用品，用与常规材料相同的结构形式、尺寸、形状和连接方法来制作复合材料构件，设计时的荷载条件、安全系数、计算方法均完全套用常规材料的规范。由于复合材料一般有高的比强度和比刚度，尽管等代设计完全不注意利用复合材料各向异性而显得不合理，一般仍能得到比常规材料轻的结构。在等代设计中常常将复合材料人为地构成准各向同性，以缩小与常规材料在性能上的差别。比这前进一步的设计是承认复合材料的各向异性是其优点，但往往要把构件设计成力学性能对称的，以避免由于温度变化产生的翘曲。这是由于没有认识到这种热翘曲是一种有规律可循、可以控制和大有利用价值的特性，以致使复合材料结构偏于笨拙、保守、造价与重量高而可靠性却并未因此而相应提高。网格分析法（Netting Analysis）认为，在纤维增强复合材料中，只有纤维在沿着纤维方向提供承载能力，在分析中完全忽略基体作用。

2. 局部增强法（Selective Reinforcement）。这种设计方法的要点是在常规材料结构的关键部位上，增用一些复合材料。例如，在加颈体的凸缘上采用单向纤维复合材料，形成复合

材料与常规材料构成的混合结构。这种方法符合复合材料的设计思想，但由于它是在常规材料结构基础上的修补，因而在设计分析或者工艺方法上都显得复杂和麻烦，甚至可能会产生一些新的问题。

3. 综合设计法。这种方法充分考虑复合材料性能的可设计性。目前，这种设计方法的内容可包括：根据结构各处工作环境及荷载的类型与量级，对不同地点与方位选用增强材料和基体，确定它们的体积含量、配置方向及成型方法。这种设计是在已有的增强材料和基体的基础上，考虑不同相之间在化学、机械、热、电等诸方面的相容性及界面现象，并运用关于复合材料力学及断裂机理研究的知识，使复合材料的特点得到充分发挥，以获得优化的材料与结构。

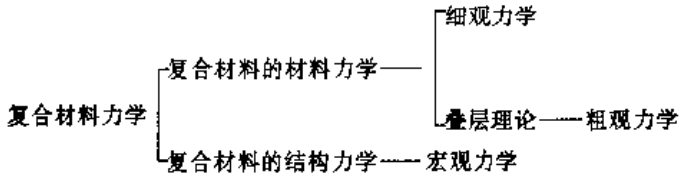
二、复合材料力学性能

从力学分析的角度看，复合材料同常规材料（例如金属材料）的显著区别是，前者被看作均质的和各向同性的，后者往往被看作非均质和非各向同性的。所谓“均质”就是指物体内各点的性能相同，也就是说物体的性能不是物体内位置的函数，而“非均质”概念正好与此相反。所谓“各向同性”就是在物体内一点的每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”则正好与此相反。

一种材料可以视为均质的，也可以视为非均质的，这取决于分析时观察问题的尺度。事实上，从原子水准来说，任何材料都是不连续的和非均质的。当所考虑的区域增大到某种程度时，原子结构在分析中已经失去了它的重要性，连续介质力学的理论开始有效。对于常规材料，即可视为均质的。而对于复合材料，由于存在可以从界面区分的相和叠层，一般认为是非均质的。但是，随分析的尺度继续扩大以后，它又可以用等效的均质体来代替。例如，颗粒复合材料和方向随机分布的短纤维复合材料可认为是均质各向同性的，而纤维（包括织物）规则排列的复合材料，通常可认为是均质各向异性的。

三、复合材料力学分析方法的分类与应用范围

由于考察对象的尺度不同，复合材料力学分析曾被区分为微观与宏观两个体系。在传统上，微观力学的研究范围以原子、分子或晶格的大小为其尺寸。固体力学则属于宏观力学，它研究各种结构和元件在不同荷载及环境下的强度、变形、稳定性和冲击、振动等问题，以及有关材料的力学性能和强度理论。对于复合材料力学，这种划分尚嫌粗糙，它的体系可以划分如下：



细观力学　复合材料的细观力学研究单向（或单层）复合材料的平均物理性能与各相材料的物理性能和相几何之间的关系，以及研究复合材料非均匀介质各相内部的起初应力与应变场分布，以作为确定复合材料性能与破坏机理的根据。此时，复合材料被视为连续的非均匀介质，在分析中常常引入“典型单元体”（Representative Volume Element）的概念。典型单元体，通常应包含有复合材料中的各个相，并且有与整个复合材料相同的特征的最小体积单位。

叠层理论(粗观力学) 在叠层理论中，各单层分别视作是均质的。由单层叠合而成的层合板的性能，取决于各单层的性能及叠层几何。叠层理论主要适用于各种整齐排列的纤维及织物增强复合材料。

复合材料的结构力学 复合材料的结构力学的研究对象是用复合材料组成的各结构件，它包括结构的静力、动力和稳定分析以及结构优化设计等内容。在复合材料结构力学中，复合材料被当作是具有平均性能的材料来分析。

与道路复合材料有关的力学分析见本书第二章。

第四节 常见道路复合材料

一、钢纤维混凝土

钢纤维混凝土用于公路、桥面、机场跑道、停机坪的护面，是目前大面积浇筑混凝土的主要应用对象。其中以美国、日本、英国应用最多，德国、法国、加拿大、澳大利亚等国也有一些试验性工程。我国从70年代初以来，也先后在沈阳、太原、上海、福建、浙江、黑龙江、安徽、江苏、广州等地铺筑了一些试验路。浇筑面积一般为几千平方米，小的只有几百平方米，个别大工程已达2～3万平方米，耗用钢纤维混凝土达几十立方米到几千立方米，个别工程达一万多立方米。用于公路、桥面、机场跑道等的钢纤维混凝土护面层有粘结式和非粘结式两类。粘结式钢纤维混凝土护面层直接和原有路面层粘结，而非粘结式则将护面层浇筑在厚聚乙烯塑料布上，与原有路面不粘结。从使用效果看，以不粘结形式为好，可以减少或消除收缩裂缝。由于钢纤维混凝土抗挠曲强度高、抗冲击、耐磨损、耐疲劳性能好，在这些场所应用可以收到较好效果，如减薄路面厚度、大幅度延长工作缝间距、提高路面使用寿命等。

二、土工合成材料

土工合成材料是专门用于土木工程方面的纺织品。国外60年代开始应用这种纺织品于土木建筑工程中，80年代以来英、美、法、澳大利亚及日本开始在土木工程中广泛应用，效果十分显著。近年来我国也开始试用。目前在公路工程中主要用于沥青混合料路面表面处治、挡土墙及边坡加固、路面基层及桥头处理和临时道路等。

三、水泥沥青混凝土

水泥沥青混凝土是以水泥和沥青两种胶结料共同形成的一种复合材料，最早应用于法国的机场道面和日本的高速公路工程中，目前我国、英国、德国和俄国也进行了这方面的研究，并修筑了一些试验路。

四、玻璃纤维增强水泥

玻璃纤维增强水泥是以玻璃纤维为增强材料，以水泥净浆为基体制成的复合材料。目前在公路工程中主要用于公路标志、管道、侧沟、挡土墙及某些结构物的加固补强。

五、聚合物水泥混凝土

聚合物水泥混凝土是在普通混凝土的拌合物中再加入一种聚合物而制成的复合材料，目

前主要用于地面、路面、桥面等工程中。聚合物在混凝土内形成薄膜，填充水泥水化物和骨料之间的空隙，与水泥水化物形成网状结构，故其与普通混凝土相比具有较好的粘结性、耐久性、耐磨性，有较高的抗弯性能，减少收缩，提高不透水性、耐腐蚀性和耐冲击性。

六、短纤维沥青混凝土

短纤维沥青混凝土由短纤维与沥青混凝土复合而成。国内蔡四维等专家进行了一些试验研究，较原沥青混凝土能显著改善强度和稳定性，其增强机理与钢纤维混凝土相似。目前使用的纤维主要有尼龙短纤维和钢纤维。

道路工程中除上述复合材料外，还有改性沥青、纤维土等。以上常见道路复合材料详细内容见本书第三章、第四章和第五章。

第二章　道路复合材料的基本力学性能

第一节　复合材料的弹性特性

一、单向复合材料的宏观弹性特性

单向复合材料亦称单向层合板，它是指增强纤维在基体中按同一方向平行排列的板状复合材料，如图 2-1a)。

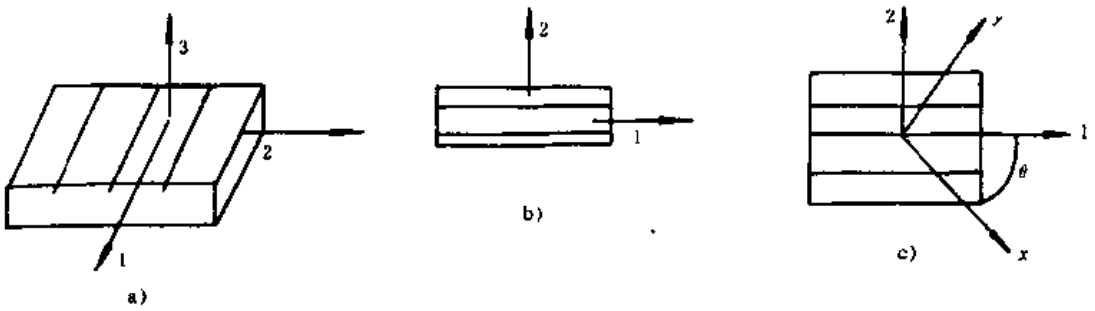


图 2-1　单向层合板

图中 1 方向为纤维方向，亦称纵向或轴向，2 方向垂直于纤维方向，通常称为横向，3 方向垂直于弹性单向板平面，称为单向板的法线方向。

在 2-3 坐标面内，纤维是随机分布的，因此宏观上可把单向板看作横观各向同性体，2-3 平面为各向同性面。

通常当单向板的厚度尺寸远小于其它两个方向的尺寸时，可假定：与单向板法线方向（3 方向）有关的应力分量与单向板面内（1-2 坐标面）的应力分量相比很小，可以忽略不计。于是对单向板的分析一般可简化为二维平面应力问题，在分析和计算时，可将图 2-1a）所示的单向板简化为图 2-1b）所示的模型，图中 1 方向代表纤维轴向，2 方向为横向。按这种方法设置的 1-2-3 坐标系称为正轴坐标系。将该坐标系绕 3 轴旋转任一角度 θ 而得到的新坐标系 xyz 坐标系（z 轴与 3 轴重合）称为偏轴坐标系，如图 2-1c)。

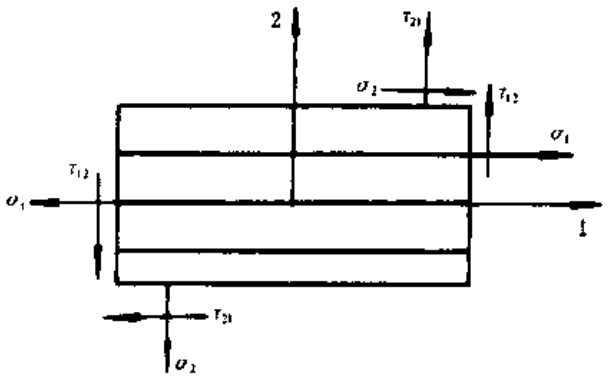


图 2-2　单向板在主（正）轴坐标系中面内应力状态简图

（一）单向复合材料的主轴弹性特征

1. 主（正）轴坐标系下的应力应变关系

在平面应力状态下单向板有 4 个独立的工程系数，即：纵向弹性模量 E_1；横向弹性模量

E_2；剪切弹性模量G和相应方向的泊松比v。按照弹性理论的应力正负规定，图2-2中所示的应力均为正方向。在平面应力状态下，根据横观各向同性体的应力应变关系，得出单向板在平面应力状态下的应力应变关系式：

$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \gamma_{12}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & 0\\ S_{12} & S_{22} & 0\\ 0 & 0 & S_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \tau_{12}\end{Bmatrix} \tag{2-1}$$

简记为，$\{\varepsilon_1\}=[S]\{\sigma_1\}$ 以及

$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \gamma_{12}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{E_1} & \dfrac{-v_{12}}{E_2} & 0\\ \dfrac{-v_{12}}{E_2} & \dfrac{1}{E_2} & 0\\ 0 & 0 & \dfrac{1}{G_{12}}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \tau_{12}\end{Bmatrix} \tag{2-2}$$

式中：$[S]$ 称为单向板的正轴柔度矩阵。其中

$$\left.\begin{aligned}&S_{11}=\frac{1}{E_1},S_{12}=\frac{-v_{21}}{E_1}=\frac{-v_{12}}{E_2}\\ &S_{22}=\frac{1}{E_2},S_{66}=\frac{1}{G_{12}}\end{aligned}\right\} \tag{2-3}$$

以及

$$\left.\begin{aligned}&E_1=\frac{1}{S_{11}},E_2=\frac{1}{S_{22}},G_{12}=\frac{1}{S_{66}}\\ &v_{21}=\frac{S_{21}}{S_{11}},v_{12}=-\frac{S_{12}}{S_{22}}\end{aligned}\right\} \tag{2-4}$$

将式（2-2）求逆，得

$$\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \tau_{12}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{11} & Q_{12} & 0\\ Q_{12} & Q_{22} & 0\\ 0 & 0 & Q_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \gamma_{12}\end{Bmatrix} \tag{2-5}$$

简记为，$\{\sigma_1\}=[Q]\{\varepsilon_1\}$，这里 $[Q]$ 称为单向板的正轴刚度矩阵。显然有 $[Q]=[S]^{-1}$ 即

$$\left.\begin{aligned}&Q_{11}=\frac{S_{22}}{S_{11}S_{22}-S_{12}^2},Q_{12}=\frac{S_{12}}{S_{22}S_{11}-S_{12}^2}\\ &Q_{22}=\frac{S_{11}}{S_{11}S_{22}-S_{12}^2},Q_{66}=\frac{1}{S_{66}}\end{aligned}\right\} \tag{2-6}$$

正轴刚度系数也可根据式（2-3）由材料的工程常数求得

$$\left.\begin{aligned}&Q_{11}=\frac{E_1}{1-v_{12}v_{21}},Q_{11}=\frac{E_1v_{12}}{1-v_{12}v_{21}}=\frac{E_2v_{21}}{1-v_{12}v_{21}}\\ &Q_{22}=\frac{E_2}{1-v_{12}v_{21}},Q_{16}=G_{12}\end{aligned}\right\} \tag{2-7}$$

2. 平面应力状态下刚度系数间的折算关系

在平面应力状态下，联系面内应力应变分量的正轴刚度系数与一般各向异性材料的刚度系数之间一般不是简单的对应相等关系，根据单向复合材料的横观各向同性和承受平面应力状态的特征，可推导出它们之间的折算公式为：

$$Q_{22}=C_{22}-\frac{C_{23}^2}{C_{22}},Q_{66}=C_{66} \tag{2-8}$$

式中：Q——联系面内应力应变分量的正轴刚度系数；

C——一般各向异性材料的刚度系数。

对于单向增强复合材料，假定把它的纤维和基体混成一体并当作均质体看待，即从宏观上看待它，则它就是各向异性体。

当图 2-1a）中，横向断面很大时，它近似于横观各向同性体。而常见的单向纤维复合材料的无纤维布单层，或是由同方向若干单层粘合而成的铺层组，整个板厚度不大时，它可以看成是二维的正交各向异性体；厚度不大的纵横两个方向都铺设纤维的单层或是若干个单向无维布彼此正交粘合而成的铺层组，也可以看成是二维的正交各向异性体。

和前面的分析类似，在平面应力状态下，$\sigma_3=\tau_{32}=\tau_{31}=0$ 可通过三维正交异性体应力应变关系推得正交异性材料的面内刚度系数 Q 和三维应力下的刚度系数 C 的相应关系为：

$$\left.\begin{aligned}Q_{ij}&=C_{ij}-\frac{C_{i3}C_{j3}}{C_{33}},C_{ij}=1,2\\Q_{66}&=C_{66}\end{aligned}\right\} \tag{2-9}$$

（二）单向复合材料的偏轴弹性特征

单向复合材料的特点之一是不同方向上的刚度不同。在研究单层板宏观力学特性时，通常总是先通过实验手段测定出它在面内弹性主方向上四个独立的工程弹性常数 E_1，E_2，G_{12}和 γ_{12}，因此可以认为：单层板的正轴柔量（柔度系数）S_{ij}或正轴模量（刚度系数）Q_{ij}（i，j=1，2，6）是已知值，求不同方向上的刚度总是由正轴刚度去求偏轴刚度，从而来建立非弹性主方向的应力应变关系式。设单层板的正轴刚度矩阵 $[Q]$ 已知，由式（2-5）的应变分量改成应变张量形式有

$$\begin{Bmatrix}\sigma_1\\\sigma_2\\\tau_{12}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{11}&Q_{12}&0\\Q_{12}&Q_{22}&0\\0&0&2Q_{66}\end{bmatrix}_{el}\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\\varepsilon_2\\\varepsilon_{12}\end{Bmatrix} \tag{2-10}$$

简记为 $\{\sigma_1\}=[Q]_0\{\varepsilon_1\}_0$

通过计算，即得到非弹性主方向的应力应变关系

$$\begin{Bmatrix}\sigma_x\\\sigma_y\\\tau_{xy}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\overline{Q}_{11}&\overline{Q}_{12}&2\overline{Q}_{16}\\\overline{Q}_{12}&\overline{Q}_{22}&2\overline{Q}_{26}\\\overline{Q}_{16}&\overline{Q}_{26}&2\overline{Q}_{66}\end{bmatrix}_{el}\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\\varepsilon_y\\\varepsilon_{xy}\end{Bmatrix} \tag{2-11}$$

式中非弹性主方向刚度矩阵 $[\overline{Q}]_0$ 与弹性主方向刚度矩阵 $[Q]_0$ 的关系为

$$[\overline{Q}]_0=[T]_{el}^{-1}[Q]_0[T]_{el} \tag{2-12}$$

其中 $[T]_{el}^{-1}$可将 $[T]_{el}$中的 θ 用 “$-\theta$” 代替而得到。

特别要注意，上式仅适用于从正轴引偏轴的变换，而不能用于从偏轴到正轴的变换。同时可以求得偏轴柔量 $\overline{S}_{ij}$与正轴柔量 S_{ij}之间的关系式：

$$\begin{Bmatrix}\overline{S}_{11}\\\overline{S}_{22}\\\overline{S}_{12}\\\overline{S}_{66}\\\overline{S}_{16}\\\overline{S}_{26}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}m^4&n^4&2m^2n^2&m^2n^2\\n^4&m^4&2m^2n^2&m^2n^2\\m^2n^2&m^2n^2&m^4+n^4&-m^2n^2\\4m^2n^2&4m^2n^2&-8m^2n^2&(m^2-n^2)^2\\2m^3n&-2mn^3&2(mn^3-m^3n)&(mn^3-m^3n)\\2mn^3&-2m^3n&2(m^3n-mn^3)&(m^3n-mn^3)\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}S_{11}\\S_{22}\\S_{12}\\S_{66}\end{Bmatrix} \tag{2-13}$$

偏轴模量矩阵 $[\overline{Q}_{ij}]$ 和偏轴柔量矩阵 $[\overline{S}_{ij}]$ 都是对称矩阵，它们呈互逆关系，即

$$[\overline{S}_{ij}]=[\overline{Q}_{ij}]^{-1}(i,j=1,2,6) \tag{2-14}$$

若用工程常数表示非弹性主方向的应力应变，可以写为

$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \gamma_{xy}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{E_x} & \frac{-v_{yx}}{E_y} & -\frac{m_x}{E_1}\\ \frac{-v_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{m_y}{E_1}\\ -\frac{m_x}{E_1} & \frac{-m_y}{E_1} & \frac{1}{G_{xy}}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{Bmatrix} \tag{2-15}$$

式中：E_1 为弹性主 1 方向的弹性模量，E_x，E_y 为 x、y 方向的弹性模量，G_{xy}为相应方向的剪切模量，v_{xy}，v_{yx}为相应方向的泊松比；m_x，m_y 为交之系数，它们反映单向复合材料在非主方向荷载作用下产生的拉—剪耦合效应，是正交向异性材料所没有的弹性常数。

二、单向复合材料弹性常数的微观力学分析

叠层复合材料的基本构造单位是复合材料层片。用微观力学的分析方法分析单向复合材料层中的弹性常数，其理论和实际意义在于：求出宏观特性和微观特性之间各物理量的关系，作为改进复合材料宏观弹性特性之用。它必须建立在实验的基础上，但有了理论的指导就可使实验工作量大大减少，而且成效显著。此外，还可以用宏观弹性常数的测定和微观力学的分析，反过来推算复合材料中的纤维和基体的平均特性。在纤维的这种平均特性中，已包括了纤维形状及排列的不规则性、纤维断裂和缺陷的影响等。在基体的这种平均特性中，已包括了基体的裂纹，界面和空隙的某种影响。纤维和基体的平均特性可以更好地反映复合材料中纤维和基体所起的作用，克服了或者大幅度地减少了不均匀的影响。

在用微观力学方法分析复合材料的弹性常数时，最主要的问题是计算模型的选择，应使它尽可能地反映实际情况并有代表性，其次才是计算方法的选择。在计算模型相同的情况下，采用弹性力学的方法要比材料力学的方法精确，但计算难度和工作量往往要大得多。因此，需要根据不同情况选择合适的计算方法。

（一）计算弹性常数的一些简化假定和简化模型

计算复合材料的弹性系数，必须采用简化假定和简化模型才能进行计算。弹性常数分析计算的精度与复杂程度，取决于简化假定是否合理，简化模型是否正确。采用简化假定和简化模型以后，就不可避免地引入了一定的误差，甚至在某些情况中可能引入很大的误差。因此要选择合适的计算方法，一般说来，既要有适当精度，又要计算方便。

1. 一些基本假定

在计算复合材料的弹性常数时，一般采用下列简化假定：(1) 假定复合材料中的纤维和基体在复合前后性能没有变化；(2) 纤维是连续的且互相平行；(3) 各纤维具有相同的截面形状和大小，沿纤维方向截面的形状和大小没有变化；(4) 纤维和基体的结合是完善的；(5) 纤维是横观各向同性或各向同性材料，基体是各向同性材料；(6) 纤维在基体中是按一定规则均匀分布的；(7) 不考虑纤维和基体中裂纹和缺陷的影响；(8) 不考虑孔隙率的影响；(9) 纤维和基体都是线性弹性的；(10) 不考虑复合材料中的残余应力，残余应变和环境的影响。

上述假定在计算不同的弹性常数时，引入了不同的误差。在计算 E_1 时，第 (7) 和第

(8) 两点假定将引入一些误差，而对于拉伸模量的影响要比压缩模量的影响小些。在计算模量 E_2（$=E_3$）和剪切模量 G_{12}（$=G_{13}$）、G_{23}时，假定（6）引入的误差最大；假定（2）、(7)、(8) 也引入一些误差。在计算泊松比 υ_{12}（υ_{13}）和 υ_{23}时，假定（7）和（8）也将会引入一些误差。

2. 几种简化的计算模型

纤维在基体中是随机排列的，见图 2-3a)。现将单向复合材料看作是正方晶系材料或横观各向同性，纤维在基体中可简化为下列几种有规则的排列情况：(1) 正向方阵排列，见图 2-3b)；(2) 斜向方阵排列，见图 2-3c)；(3) 正六角形排列，见图 2-3d)。

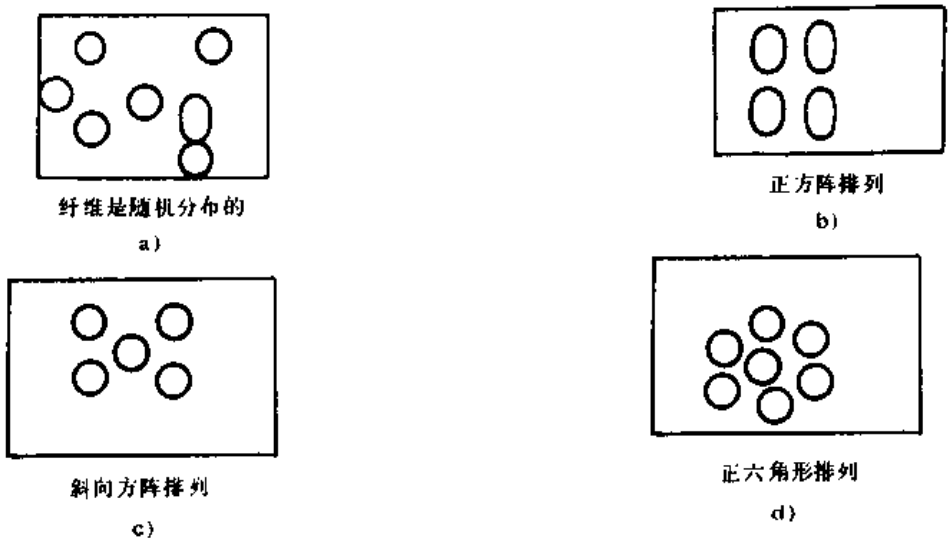


图 2-3 纤维排列

图 2-3a）～图 2-3d)，可简化为下列计算模型；图 2-4 所示的片状模型；图 2-5 所示的同心圆模型；图 2-6 所示的回字形模型；图 2-7 所示的外方内圆模型。

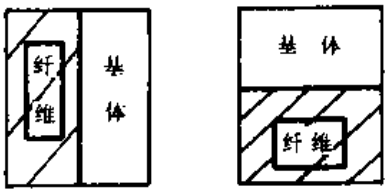


图 2-4 片状模型

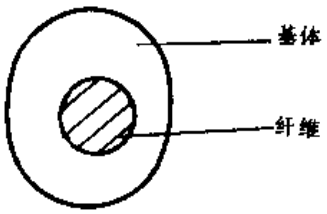


图 2-5 同心圆模型

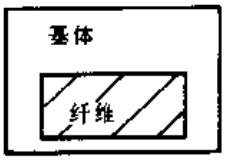


图 2-6 回字形模型

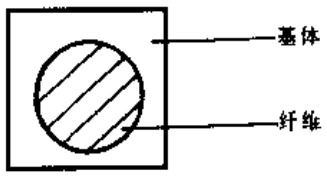


图 2-7 外方内圆模型

(二) 用材料力学的方法计算单向复合材料层片的弹性常数

假定纤维有 5 个独立的弹性常数：E_{f1}，E_{f2}，G_{f12}，G_{f23}，υ_{f12}，υ_{f23}，其中 $G_{f23}=\dfrac{E_{f2}}{2\ (1+\upsilon_{f23})}$，纤维的体积百分率为 V_f。基体是各向同性的，有两个独立的弹性常数：E_m，G_m 和 υ_m，其中

$G_m=\dfrac{E_m}{2\ (1+v_m)}$，基体百分比为 V_m。

1. 弹性模量 E_1

对于纤维增强复合材料来说，沿纤维方向的弹性模量 E_1 的数值最大，在叠层复合材料中，在提供面内（指 xy 面内）的刚度方面所起的作用最大，因而最重要。假定复合材料在纤维方向均匀受拉，纤维、基体和复合材料在纵向具有相同的拉伸变 ε_1，由应力应变关系和力的平衡条件，可得

$$E_1 = E_{f1}V_f + E_mV_m \tag{2-16}$$

这就是 E_1 的混合定律。纤维在单向复合材料横断面上分布的均匀性，并不影响有效弹性常数 E_1 的数值。

2. 弹性模量 E_2（$=E_3$）

取图 2-8 所示的计算模型 a）和 b）。

（1）串连模型（a）

在方向 2 上作用有均匀应力 σ_2，由于纤维、基体和复合材料的应力相同，有：$\sigma_2=\sigma_{f2}=\sigma_{m2}$ 在 1 方向和 3 方向上没有受力，设

$$\sigma_1 = \sigma_{f1} = \sigma_{m1} = \sigma_3 = \sigma_{f3} = \sigma_{m3} = 0 \tag{a}$$

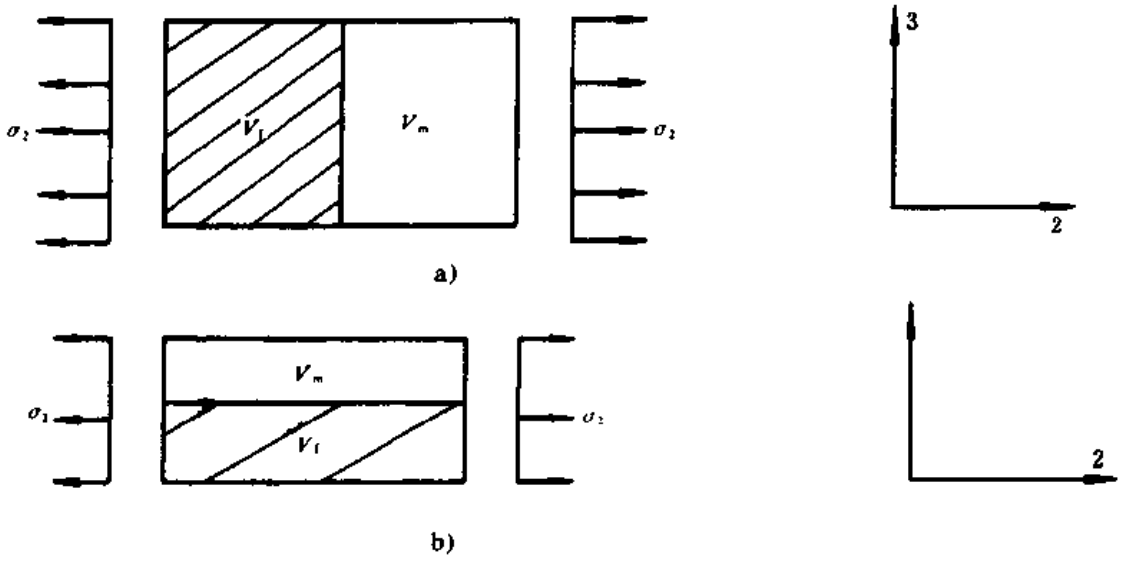


图 2-8　串联模型与并联模型

在 1 方向上、纤维、基体和复合材料的应变相同，有

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{f1} = \varepsilon_{m1} \tag{b}$$

由应力应变关系，考虑到 $\sigma_1=\sigma_3=0$ 可得

$$\varepsilon_{m2} = \frac{\sigma_{m2}}{E_m}, \varepsilon_{f2} = \frac{\sigma_{f2}}{E_{f2}}, \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2}, \tag{c}$$

注意引用

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{f2}V_f + \varepsilon_{m2}V_m \tag{d}$$

得

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_{f2}} + \frac{V_m}{E_m} \tag{2-17}$$

式（2-17）可以定性的说明 E_2 值主要是由 E_m 和 V_m 决定的，由于 $E_{f2} \gg E_m$，只有在 V_f 相当大时，E_{f2}的影响才会明显。由于纤维是随机排列的，兼有并联和串联的成份，现只按串联模型处理，当然就带来较大的误差，因此当纤维和基体的 E_{f2}和 E_m 是分别进行测定时，由公式算得的 E_2 值比实验值要小得多，此外，纤维分布的不均匀性（指有些区域 V_f 大，有些区域 V_f 小）和纤维的不平行程度也可使 E_2 的实验值增大，并带来一定的误差。

（2）并联模型（b）

和求 E_1 方法类似，但认为纤维、基体和复合材料的应变相同，$\varepsilon_2 = \varepsilon_{f2} = \varepsilon_{m2}$且由静力平衡条件有

$$\sigma_2(V_f + V_m) = \sigma_2 = \sigma_{f2}V_f + \sigma_{m2}V_m \tag{a}$$

注意到应力应变关系中，1、2 方向无应力状态

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} = \varepsilon_{f2} = \frac{\sigma_{f2}}{E_{f2}} = \varepsilon_{m2} = \frac{\sigma_{m2}}{E_m} \tag{b}$$

同时考虑（a）、（b）两式得

$$E_2 = E_{f2}V_f + E_mV_m \tag{2-18}$$

3. 剪切模量 G_{12}（$=G_{13}$和 G_{23}）

取如图 2-9 所示的计算模型 a）和 b）（在图中只画出左右两面上的剪应力）。

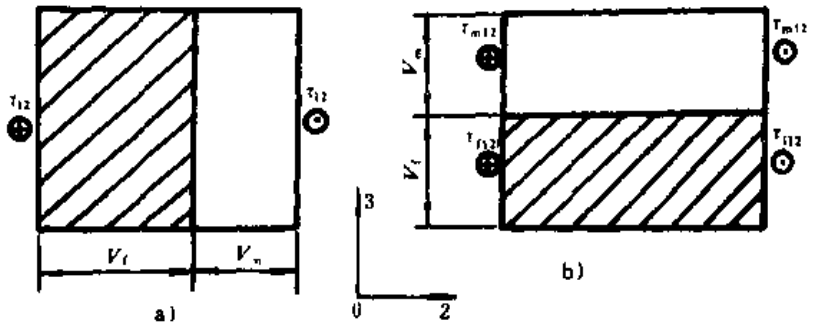


图 2-9　剪切模量 G_{12}计算模型

（1）串联模型（a）

在片状模型的左右两面，作用有均匀的剪应力 τ_{12}，等于纤维和基体剪应力，即

$$\tau_{12} = \tau_{f12} = \tau_{m12} \tag{a}$$

剪应变之间的关系

$$\gamma_{21} \times 1 = V_f\gamma_{f12} + V_m\gamma_{m12} \tag{b}$$

由应力应变关系，有

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}, \gamma_{f12} = \frac{\tau_{f12}}{G_{f12}}, \gamma_{m12} = \frac{\tau_{m12}}{G_{m12}} \tag{c}$$

最后得

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{v_f}{G_{f12}} + \frac{v_m}{G_m} \tag{2-19}$$

（2）并联模型（b）

设纤维、基体和复合材料具有共同的剪应变，即

$$\gamma_{f12} = \gamma_{m12} = \gamma_{12} \tag{a}$$

左右两边的剪力为 $\tau_{12} \times 1$，等于纤维和基体的剪力之和，即

$$\tau_{12} = \tau_{f12}V_f + \tau_{m12}V_m \tag{b}$$

由应力应变关系，有

$$\tau_{12} = G_{12}\gamma_{12}, \tau_{f12} = G_{f12}\gamma_{f12}, \tau_{m12} = G_{m12}\gamma_{m12} \tag{c}$$

诸式综合后可得

$$G_{12} = G_{f12}V_{F12} + G_mV_m \tag{2-20}$$

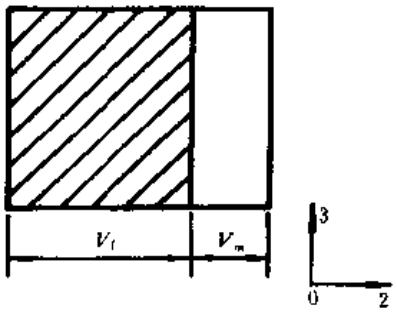


图 2-10　泊松比计算模型

同理可得串联模型时

$$\frac{1}{G_{23}} = \frac{V_f}{G_{f23}} + \frac{V_m}{G_m} \tag{2-21}$$

并联时：

$$G_{23} = G_{f23}V_f + G_mV_m \tag{2-22}$$

4. 泊松比 ν_{12}

取如图 2-10 所示的片状计算模型

设在纤维方向有均匀的拉伸应变 ε_1，在片状模型方向 2 上，复合材料的收缩应变 ε_2 为纤维和基体收缩应变之和，即

$$\varepsilon_2 = \nu_{12}\varepsilon_1 = (\upsilon_{f12}V_f + \upsilon_mV_m)\varepsilon_1 \tag{2-23}$$

得：

$$\nu_{12} = \upsilon_{f12}V_f + \upsilon_mV_m \tag{2-24}$$

（三）用弹性力学方法计算复合材料层片的弹性常数

1. 线性弹性体的变分原理

对于一个弹性体平衡问题，求其精确解一般是很困难的，一般常常需要应用变分原理求其近似解。最小势能和最小余能原理是两个最基本而又最重要的变分原理。

1）最小势能原理

在所有满足位移连续的位移边界条件的可能位移中，真实位移满足平衡方程和力的边界解，使势能取最小值。

记总势能为 Π_1，它由弹性体的势能和外力的势能构成。

$$\Pi_1 = \iiint_{\Omega}(\overline{W} - Xu - Yv - Zw)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z - \iint_{S_2}(\overline{p}_xu + \overline{p}_yv + \overline{p}_zw)\mathrm{d}s \tag{2-25}$$

其中 Ω 为弹性体所占的空间，S_2 为给定面力 $\overline{p}_x$，$\overline{p}_y$，$\overline{p}_z$ 的那部分边界，$\overline{W}$ 为应变能密度，X，Y，Z 为体积力分量。

最小势能原理要求，$\delta\Pi_1=0$，这等价于力的平衡方程和力的边界条件。

2）最小余能原理

在所有满足平衡方程和力的边界条件的可能应力状态中，真实应力状态满足协调方程和位移边界的协调条件，使余能取最小值。

记总余能为 Γ_1，它由弹性体的余能和外力余能构成。

$$\Gamma_1 = \iiint_{\Omega}V\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z - \iint_{S_1}(p_x\overline{u} + p_y\overline{v} + p_z\overline{w})\mathrm{d}s \tag{2-26}$$

其中，S_1 为给定位移 $\overline{u}$，$\overline{v}$，$\overline{w}$ 的那部分边界，V 为余应变能密度。

最小余能原理要求，$\delta\Gamma_1=0$。

2. 弹性力学的极值法

所谓极值法就是用能量极值原理来确定复合材料工程常数的上下限方法。

弹性体变形时，对于线性弹性其应变能 U 和应变余能 U_c 相等，即

$$U = U_c = \frac{1}{2}\int_{\Omega}(\sigma_1\varepsilon_1 + \sigma_2\varepsilon_2 + \sigma_3\varepsilon_3 + \tau_{12}\gamma_{12} + \tau_{23}\gamma_{23} + \tau_{31}\gamma_{31})\mathrm{d}\Omega \tag{2-27}$$

1）用最小势能确定上界值

(1) E_1 上限值的确定

设单向复合材料有任一满足指定位移边界条件的容许应变场。

$$\varepsilon_1^* = \varepsilon, \varepsilon_2^* = \varepsilon_3^* = -\nu\varepsilon, \gamma_{23}^* = \gamma_{31}^* = \gamma_{12}^* = 0 \tag{a}$$

式中：ν 为复合材料的泊松比。利用广义虎克定律，可分别求得纤维和基体中的应力场（假定纤维和基体均匀，为各向同性）。

$$\left.\begin{aligned}
&\sigma_{f1}^* = \left(\frac{1 - V_f - 2V_fV}{1 - V_f - 2V_f^2}\right)E_f\varepsilon, \sigma_{f2}^* = \sigma_{f3}^* = \left(\frac{V_f - V}{1 - V_f - 2V_f^2}\right)E_f\varepsilon \\
&\tau_{f23}^* = \tau_{f31}^* = \tau_{f12}^* = 0, \sigma_{m23}^* = \sigma_{m31}^* = \sigma_{m12}^* = 0 \\
&\sigma_{m1}^* = \left(\frac{1 - V_m - 2V_mV}{1 - V_m - V_m^2}\right)E_m\varepsilon, \sigma_{m2}^* = \sigma_{m3}^* = \left(\frac{V_m - V}{1 - V_m - 2V_m^2}\right)E_m\varepsilon
\end{aligned}\right\} \tag{b}$$

将 a)、b) 两式代入式 (2-27)，分别在纤维体和基体体积中积分，得对应于可能位移状态的应变能密度为

$$U^* = \frac{\varepsilon^2}{2}\left[\frac{1 - V_f - 4V_fV + 2V^2}{1 - V_f - 2V_f^2}E_fV_f + \frac{1 - V_m - 4V_mV + 2V^2}{1 - V_m - 2V_m^2}\right] \tag{c}$$

当单向复合材料仅承受 σ_1 时，应变能密度为

$$U = \frac{1}{2}E_1\varepsilon^2 \tag{d}$$

在纤维和基体中所假定的上述应变状态，虽然满足位移连续条件和位移边界条件，但不一定满足应力的平衡方程和应力的边界条件，所以不一定是真实解。由最小势能原理可得 $U^* \geqslant U$，即

$$E_1 \leqslant \frac{1 - V_f - 4V_fV + 2V^2}{1 - V_f - 2V_f^2}E_fV_f + \frac{1 - V_m - 4V_mV + 2V^2}{1 - V - 2V_m^2}E_mV_m \tag{2-28}$$

在式 (2-28) 中，泊松比 ν 是未知的。根据最小势能原理，应变能 U^* 表达式 (c) 必须对于不确定的常数 ν 求极小值，即需求 $\frac{\partial U^*}{\partial \nu} = 0$，$\frac{\partial U^*}{\partial \nu^2} > 0$，这样可以使 U^* 较小，因而使 E_1 的上界较小，可得

$$\nu = \frac{V_f(1 - V_m - 2V_m^2)E_fV_f + V_m(1 - V_f - V_f^2)E_mV_m}{(1 - V_m - 2V_m^2)E_fV_f + (1 - V_f - V_f^2)E_mV_m} \tag{2-29}$$

对于常见的复合材料，V_f 和 V_m 相差不大，若取 $V_f = V_m = V$，则式 (2-28) 可化为

$$E_1 \leqslant E_fV_f + E_mV_m$$

这就是熟知的并联模型公式。可见材料力学方法所得 E_1 为极值法的上限。

(2) E_2，G_{12}的上限值的确定

用类似的方法，分别给出两种应变容许场

$$\left.\begin{aligned}
&\varepsilon_2^* = \varepsilon, \varepsilon_1^* = \varepsilon_3^* = -\nu\varepsilon, \nu_2^* = \gamma_{23}^* = \gamma_{12}^* = 0 \\
&\varepsilon_1^* = \varepsilon_{21}^* = \varepsilon_2^* = 0\ \gamma_{23}^*, \gamma_{31}^* = 0, \gamma_{12}^* = \gamma
\end{aligned}\right\} \tag{a}$$

应用最小势能原理可得

$$\left.\begin{aligned} E_2 &\leqslant E_f V_f + E_m V_m \\ G_{12} &\leqslant G_f V_f + G_m V_m \end{aligned}\right\} \tag{2-30}$$

2）用最小余能原理确定下界值

在有代表性的复合材料微小体积上，作用有均匀的单向应力 $\sigma_x=\sigma$，则单位体积的余能为（余能密度）

$$\overline{W}_c = \frac{1}{2}\frac{\sigma^2}{E} \tag{a}$$

在所取的微小体积内，设纤维和基体中均匀有相同的应力，这就是可能应力状态，在这种状态下单位体积的余能为

$$\overline{W}_c = V_f\left(\frac{\sigma^2}{2E_f}\right) + V_m\left(\frac{\sigma^2}{2E_m}\right) \tag{b}$$

显然，上述的应力状态已满足应力的平衡方程和应力边界条件，但不一定满足位移连续条件和位移边界条件，所以不一定是真实解。由最小余能原理可得 $\overline{W}_c^* \geqslant \overline{W}_c$，即

$$\frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \geqslant \frac{1}{E_x}, \text{或} \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \leqslant E_x \tag{2-31}$$

这就是熟知的串联模型的公式。如果将 E_x 理解为 E_1 或 E_2，则由式（2-31）分别得出 E_1 或 E_2 的下限界值。采用类似的方法，也可得到 G_{12}的下限界值公式

$$\frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f} \leqslant G_{12} \tag{2-32}$$

采用变分原理可以对许多简化模型进行分析，找到比较接近的上、下界限值。但是采用简化模型时，就不可避免地要引入一定的误差，有时甚至是较大的误差。所以考察一上、下界限接近的程度如何，是有必要的。如果简化模型选择合理，可以得到较好的结果。

（四）分析法预测工程常数的经验修正

对于弹性常数计算公式以及弹性模量公式，不论它们是用材料力学或弹性力学方法导得的，还是用解析法或者用有限元法计算得到的，在计算时都要采用简化假定和简化模型，因而不能完全反映实际情况，引入了或大或小的误差。所谓经验修正法就是以理论预测公式为基础，引入一些由实验确定的经验系数，对理论预测作修正，使其与试验值吻合[6]。

哈尔平和蔡（*Halpin-Tsai*）提出了一个简单而具有普遍性的公式，其表达式为

$$\frac{M}{M_m} = \frac{1+\xi\eta V_f}{1-\eta V_f}$$

式中：

$$\eta = \frac{M_f/M_m - 1}{M_f/M_m + \xi} \tag{2-33}$$

M 是指要预测的工程常数，如 E_1、E_2、G_{12}等；M_f 是指纤维的相应工程常数，M_m 是基体的相应常数，ξ 是对纤维增强作用的度量，它可以从 0 变化到∞，其大小取决于纤维的几何排列方法和加载方式，当 $\xi=0$，可得

$$\frac{1}{M} = \frac{V_f}{M_f} + \frac{V_m}{M_m} \tag{a}$$

上式（a）中，M 给出工程的下限，如果 $\xi=\infty$，则得

$$M = M_f V_f + M_m V_m \tag{b}$$

一般给出工程常数的上限。因此 ξ 越大表示纤维的增强作用越大。

三、复合材料弹性系数间的约束关系

复合材料弹性系数的确定是复合材料分析与计算的一个重要方面，前面着重于计算及方法的介绍。这里将介绍作为一般各向异性体的复合材料各弹性系数之间的约束关系，这对检验计算法导出的弹性系数或通过样品试验得到的弹性系数是否合理，将有很好的实际意义。

对于各向同性材料，弹性常数的约束形式可表示为

$$E>0,G>0,0\leqslant\nu\leqslant\frac{1}{2} \tag{2-34}$$

上式中 E，G，ν 分别为材料的弹性模量、剪切模量和泊松比。同样对于各向异性材料，由于应变能表达式是

$$U=\frac{1}{2}[\sigma]^T[S][\sigma] \tag{2-35}$$

其中，$[\sigma]^T$ 是应力向量，$[\sigma]^T=[\sigma_1,\ \sigma_2,\ \sigma_3,\ \sigma_{23},\ \sigma_{31},\ \sigma_{12}]$

$[S]$ 为材料的柔度系数矩阵。从 U 的正定性质来看，这就是要求行列式 $[S]$ 的各阶主子式为正。对正交各向异性体有

$$[S]=\begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{vmatrix} \tag{2-36}$$

要求

$$\begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ \cdots\cdots & & & \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mm} \end{vmatrix}>0 \qquad (m=1,2,\cdots,6), \tag{2-37}$$

这就得出各柔量间的如下关系：

$$S_{ii}>0(i=1,2,\cdots,6),S_{11}S_{22}>S_{12}^2,$$
$$S_{22}S_{33}>S_{23}^2,S_{33}S_{11}>S_{13}^2,S_{11}S_{22}S_{33}+2S_{12}S_{23}S_{13}>S_{11}S_{23}^2+S_{22}S_{13}^2+S_{33}S_{12}^2 \tag{2-38}$$

用工程常数来表达时，有 E_1，E_2，E_3，G_{23}，G_{31}，$G_{12}>0$，$|\gamma_{21}|<\sqrt{\frac{E_2}{E_1}}$，$|\gamma_{12}|<\sqrt{\frac{E_1}{E_2}}$，$|\gamma_{32}|<\sqrt{\frac{E_3}{E_2}}$，$|\gamma_{23}|<\sqrt{\frac{E_2}{E_3}}$，$|\gamma_{13}|<\sqrt{\frac{E_1}{E_3}}$，$|\gamma_{31}|<\sqrt{\frac{E_3}{E_1}}$，

$$\gamma_{21}\gamma_{32}\gamma_{13}<\frac{1-\gamma_{21}^2\left(\frac{E_1}{E_2}\right)-\gamma_{31}^2\left(\frac{E_2}{E_3}\right)-\gamma_{13}^2\left(\frac{E_1}{E_2}\right)}{2}<\frac{1}{2} \tag{2-39}$$

例如某硼纤维—环氧复合材料，$E_1=11.86\times10^5\times0.0703\text{MPa}$，$E_2=1.33\times10^5\times0.0703\text{MPa}$，$\gamma_{12}=1.97$，$\sqrt{\frac{E_1}{E_2}}=2.99$，可见 $|\gamma_{12}|<\sqrt{\frac{E_1}{E_2}}$，说明 ν_{12} 值是合理的。然而，对各向同性材料就不可能有这么大的泊松比。

第二节　复合材料的强度准则

一、概　　述

材料的强度问题是研究材料在各种环境下因应力过大或变形过大发生破坏的问题。复合材料的强度问题比较复杂，其原因除了强度问题本身固有的复杂性之外，主要还因为复合材料是多相组合体，从微观力学的观点来看，材料破坏可以是以下几种形式。

（一）材料破坏的几种形式

1. 纤维主导的破坏（断裂、微观皱折（屈曲）等）；

2. 整个基体主导的破坏（空穴、细微裂纹等）；

3. 界面分层为主导的破坏（裂纹扩展、界面剥离、脱层等）。

因此，复合材料的破坏总是从上述最薄弱点之一开始的，逐渐发展至整体破坏。复合材料强度的微观理论就是用纤维、基体和界面的性能特点及有关的几何参数等来进行复合材料强度的力学分析，研究材料的破坏过程及其破坏机理。

（二）材料的基本强度

对于工程实用来说，目前主要是应用宏观强度理论。这时将材料视为均质体，通过试验观察其破坏现象，从而总结出有关破坏的变化规律，建立材料破坏的判据，以预测破坏的发生。这种唯象性的宏观强度理论虽然不能解释复合材料的破坏过程，但能提供在各种受载条件下复合材料的强度破坏值，所以得以较普遍地采用。

复合材料强度的显著特点是它的方向性。在平面应力状态下，材料的基本强度有五个，即

1. X_T——材料在纵向弹性主方向上的拉伸强度；

2. X_c——材料在纵向弹性主方向上的压缩强度；

3. Y_T——材料在横向弹性主方向上的拉伸强度；

4. Y_c——材料在横向弹性主方向上的压缩强度；

5. S——材料在纵横向的剪切强度。

这些基本强度都是沿材料弹性主方向受单向拉伸、压缩或纯剪切试验测得的。根据这些基本强度建立的各向异性材料整体破坏准则，就是力图通过利用弹性主方向的基本强度来预测各向异性材料在复杂应力状态下的强度。

（三）基本要求

作为一种原则，一种复合材料的强度准则方程，它应满足下列几项基本要求：

1. 强度准则必须不受坐标变换的影响，即当坐标系改变时强度准则方程仍然成立；

2. 强度准则在应力空间所确定的失效包络曲面（或平面失效包络曲线），必须是有界的。

3. 强度准则的形式应尽可能简单，以便于工程应用。

4. 强度准则要反映出不同材料各自的特点。

二、常用的复合材料强度准则

在研究复合材料的强度准则方面的进展远不如对复合材料刚度特性的研究，这主要是复合材料的种类很多，性能差别很大，微观构造、缺陷和损伤的多少及其分布很不相同，破坏形式的多样性，尤其是不均匀、不连续和各向异性材料破坏形式的多样性，使得材料强度问

题比刚度问题复杂和困难得多，试验结果也分散得多。

目前在工程中常用的唯象性破坏准则可分以下三种基本类型：

应力主导型最大应力准则；应变主导型最大应变准则；交互作用型其中包括蔡—希尔（*Tsai-Hill*）准则、霍夫曼（*Hoffman*）准则、蔡—吴准则。

（一）最大应力理论

Jenkins（1920）把各向同性材料中的最大应力理论推广到正交异性材料中，他认为只要材料弹性主轴方向任何一个应力分量达到相应的基本强度时，材料就发生破坏，其强度判据式为

$$\sigma_1 = X \qquad \sigma_2 = Y \qquad \sigma_{12} = S \tag{2-40}$$

（二）最大应变理论

该理论为，当沿材料弹性主轴发生的应变达到它们的极限值时，材料就发生破坏。利用这些条件估计正交异性材料的破坏，得到强度判据式为

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1c} \qquad \varepsilon_2 = \varepsilon_{2c} \qquad \gamma_{12} = \gamma_{12c} \tag{2-41}$$

式中三个主要变值 ε_{1c}，ε_{2c}，γ_{12c} 为在相应方向上应变的临界值。

实际上，上述两个理论都是由一些分破坏准则组成的，每个分准则是各自独立的。它们只根据某一应力分量或应变分量自身的数值来判断材料是否发生破坏。这种判断并不受其他应力或应变分量的影响。也就是说，各应力或应变分量之间的相互作用对材料破坏的影响被忽略了，这是一类最简单的破坏准则。

（三）交互作用理论

这一类理论认为：材料破坏强度依赖于各应力分量交互影响的综合作用。即判断材料是否发生破坏，需要考虑全部应力分量的综合效果。

1. 蔡—希尔准则

最早的一个各向异性材料的交互作用破坏准则是 Hill 创立的。希尔将各向同性材料的密赛斯屈服条件

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2) = 2\sigma_0^2 \tag{2-42}$$

推广到正交异性材料，并将屈服条件写成

$$F_2(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + F_3(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + F_1(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + F_4\sigma_{23}^2 + F_5\sigma_{31}^2 + F_6\sigma_{12}^2 = 1 \tag{2-43}$$

这里，F_1，F_2，F_3，F_4，F_5，F_6 反映了所存在的材料各向异性的状态，是表征正交异性材料性能的强度参数。它们可由材料基本强度表示。

对单向纤维增强复合材料来说，$F_5 = F_6$（沿 1-2 面和 1-3 面的剪切基本强度相同），$F_1 = F_3$（沿 2 和 3 方向的拉、压基本强度相同），于是得：

$$F_2(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + F_1(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + F_1(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + F_4\sigma_{23}^2 + F_5(\sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2) = 1 \tag{2-44}$$

对于叠层复合材料，在 $\sigma_3 = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$ 的平面应力状态中，式（2-43）简化为

$$F_2\sigma_2^2 + F_1\sigma_1^2 + F_1(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + F_5\sigma_{12}^2 = 1 \tag{2-45}$$

Marin 把 Hill 准则推广到拉压强度不等的各向异性材料。如果用主应力表达，则假设材料发生破坏（屈服）时满足下列条件

$$(\sigma_1 - a)^2 + (\sigma_2 - b)^2 + (\sigma_3 - c)^2 + q[(\sigma_1 - a)(\sigma_2 - b) + (\sigma_2 - b)(\sigma_3 - c) + (\sigma_3 - c)(\sigma_1 - a)] = \sigma^2 \tag{2-46}$$

其中 a，b，c，q 是由实验测定的参数。

Norris 进一步推广了 Marin 的各向异性破坏准则，他引入 6 个强度参数来定义破坏，并将破坏判据式写为

$$\left.\begin{aligned}\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2+\left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2-\frac{\sigma_1\sigma_2}{XY}+\left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2=1\\ \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2+\left(\frac{\sigma_3}{Z}\right)^2-\frac{\sigma_2\sigma_3}{YZ}+\left(\frac{\sigma_{23}}{T}\right)^2=1\\ \left(\frac{\sigma_3}{Z}\right)^2+\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2+\frac{\sigma_3\sigma_1}{ZX}+\left(\frac{\sigma_{31}}{R}\right)^2=1\end{aligned}\right\} \tag{2-47}$$

式中：X，Y，Z 是材料的拉伸（或压缩）屈服强度，而 R，S，T 是相应的剪切强度。

对于平面应力状态，上式简化为

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2+\left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2-\frac{\sigma_1\sigma_2}{XY}+\left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2=1 \qquad \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2=1 \qquad \left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2=1 \tag{2-48}$$

Azzi 和 Tsai 将 Hill 准则推广到纤维增强复合材料。考虑到单向板处于平面应力状态，并且是横观各向同性材料，而 $Z=Y$，所以修正的 Hill 平面应力准则，即通常所说的蔡—希尔准则可写为

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2+\left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2-\frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2}+\left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2=1 \tag{2-49}$$

上述结果同 Norris 准则得到的结果相似。差别仅在于 σ_1，σ_2 交叉作用项不同。

应当强调，蔡—希尔准则原则上只能用于在材料主方向上拉压性能相同的各向异性材料，否则应作适当的修正。

2. 霍夫曼准则

为了考虑脆性材料的因素（拉压强度不同），霍夫曼（1967）将 Hill 准则（式 2-43）中应力表达的形式上增加了 σ_1，σ_2，σ_3 的奇次项。认为材料发生破坏时满足下式，即

$$\begin{aligned}&F_1(\sigma_2-\sigma_3)^2+F_2(\sigma_3-\sigma_1)^2+F_3(\sigma_1-\sigma_2)^2+F_4\sigma_1\\&+F_5\sigma_2+F_6\sigma_3+F_7\sigma_{23}^2+F_8\sigma_{13}^2+F_9\sigma_{12}^2=1\end{aligned} \tag{2-50}$$

式中：F_1，F_2，…，F_9 是由材料性质试验确定的表征材料性能的强度参数。它们由 9 个材料基本强度所确定，其计算式为

$$\begin{aligned}&F_1=\frac{1}{2}\left[\frac{1}{Y_TY_C}+\frac{1}{Z_TZ_C}-\frac{1}{X_TX_C}\right] \quad F_2=\frac{1}{2}\left[\frac{1}{Z_TZ_C}+\frac{1}{X_TX_C}-\frac{1}{Y_TY_C}\right]\\&F_3=\frac{1}{2}\left[\frac{1}{X_TX_C}+\frac{1}{Y_TY_C}-\frac{1}{Z_TZ_C}\right] \quad F_4=\frac{1}{X_T}-\frac{1}{X_C} \quad F_5=\frac{1}{Y_T}-\frac{1}{Y_C}\\&F_6=\frac{1}{Z_T}-\frac{1}{Z_C} \quad F_7=\frac{1}{T^2} \quad F_8=\frac{1}{R^2}\ F_9=\frac{1}{S^2}\end{aligned} \tag{2-51}$$

将式（2-50）用于单向板，考虑到单向板处于平面应力状态，且有 $Y_T=Z_T$，$Y_C=Z_C$，霍夫曼准则可写为

$$\frac{\sigma_1^2}{X_TX_C}+\frac{\sigma_2^2}{Y_TY_C}-\frac{\sigma_1\sigma_2}{X_TX_C}+\frac{X_C-X_T}{X_TX_C}\sigma_1+\frac{X_C-X_T}{Y_TY_C}\sigma_2+\frac{\sigma_{12}^2}{S}=1 \tag{2-52}$$

显然，当 $X_T=X_C$，$Y_T=Y_C$ 时，式（2-52）就化为蔡—希尔准则（式 2-49）。

3. 蔡—吴应力张量多项式理论

为了把材料破坏阐述得更全面，蔡—吴（1971）进一步推广了霍夫曼准则，他们把原有的破坏准则归结为一种高阶张量多项式破坏准则，这一破坏准则的一般形式为

$$F_i\sigma_i+F_{ij}\sigma_i\sigma_j+F_{ijk}\sigma_i\sigma_j\sigma_k+\cdots=1(i,j,k,\cdots=1,2,\cdots\cdots,6) \tag{2-53}$$

式中：σ_i 为一点的应力向量，F_i，F_{ij}，F_{ijk}，…是表征材料特性的强度张量，它们都是对称张量，而且可以通过试验用材料基本强度表示。

当然，应力张量多项式取的项数愈多，精度愈高。但是，随着项数增加，确定强度张量所需的试验难度和费用也大大增加。

若取前二项，则二阶应力张量破坏准则可写为

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1 \qquad (i,j = 1,2\cdots\cdots,6) \tag{2-54}$$

由于在正轴坐标系下，面内剪切强度 S 与剪应力的符号无关。因此，在正轴坐标系中，剪应力方向的改变不会影响材料的强度，这样在强度准则方程中凡是与剪应力一次项相对应的强度参数必须为零，即

$$F_6 = F_{16} = F_{26} = 0 \tag{2-55}$$

将式（2-55）代入式（2-54），展开后得

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \tag{2-56}$$

式中前 5 个强度参数可由如下简单加载试验求得

$F_1X_1 + F_{11}X_1^2 = 1$，仅当 $\sigma_1 > 0$；$-F_1X_0 + F_{11}X_0^2 = 1$ 仅当 $\sigma_1 < 0$；$F_{66}S^2 = 1$；仅当 $\sigma_6 \neq 0$；

$$F_2Y_1 + F_{22}Y_1^2 = 1，仅当\ \sigma_2 > 0；-F_2X_0 + F_{22}X_0^2 = 1\ 仅当\ \sigma_2 < 0； \tag{2-57}$$

从上式可解出

$$F_1 = (1/X_1) - (1/X_C)，F_2 = (1/Y_1) - (1/Y_C)，F_{11} = 1/X_1X_C，F_{22} = 1/Y_1Y_C$$

$$F_{66} = 1/S^2 \tag{2-58}$$

还没有测定的一个强度参数 F_{12}，它与两个正应力有关，称为相互作用系数。为了确定 F_{12}，需要设计一个组合应力状态试验，使 $\sigma_1\sigma_2$ 项不为零，如取 $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_0$（$\sigma_0$ 为极限应力），则由式（2-56）得

$$(F_1 + F_2)\sigma_0 + (F_{11} + 2F_{12} + F_{22})\sigma_0^2 = 1 \tag{2-59}$$

将式（2-58）代入上式，便可求出

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma_0^2}\left[1 - \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C} + \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}\right)\sigma_0 - \left(\frac{1}{X_TX_C} + \frac{1}{Y_TY_C}\right)\sigma_0^2\right] \tag{2-60}$$

显然可以把式（2-54）写成矩阵形式

$$(F_1,F_2,F_6)\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\end{Bmatrix} + (\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)\begin{bmatrix}F_{11} & F_{12} & F_{16}\\ F_{12} & F_{22} & F_{26}\\ F_{16} & F_{26} & F_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\end{Bmatrix} = 1 \tag{2-61}$$

简记为

$$\{F_i\}^T\{\sigma_i\} + \{\sigma_i\}^T[F_{ij}]\{\sigma_i\} = 1 \tag{2-62}$$

比较蔡—希尔准则式（2-43）和式（2-61），可知蔡—希尔理论式（2-43）也可类似式（2-61）的二阶张量多项式形式，其中

$$F_i = 0,(i,j = 1,2,6),[F_{ij}] = \begin{bmatrix}F_1+F_3 & -F_1 & -F_3 & 0 & 0 & 0\\ F_1 & F_1+F_2 & -F_2 & 0 & 0 & 0\\ -F_3 & -F_2 & F_2+F_3 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & F_4 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_5 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_6\end{bmatrix} \tag{2-63}$$

同样，霍夫曼理论式（2-50）也可写成二阶张量多项式形式，其中

$$F_i=\begin{Bmatrix}F_4\\F_5\\F_6\\0\\0\\0\end{Bmatrix},[F_{ij}]=\begin{bmatrix}F_1+F_3 & -F_1 & -F_3 & 0 & 0 & 0\\ F_1 & F_1+F_2 & -F_2 & 0 & 0 & 0\\ -F_3 & -F_2 & F_2+F_3 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & F_7 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_8 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_9\end{bmatrix} \tag{2-64}$$

因此蔡—希尔理论及霍夫曼理论都是二次张量多项式破坏准则的特殊情况。

第三节　复合材料的损伤及分析

任何固体材料其中包括复合材料都由一定的微结构组成，而材料的微结构变化直接影响它的力学性能和其它性能。通常把引起材料强度劣化的微结构变化称为损伤。微缺陷（微裂纹和微孔洞）的成核，发展及合并造成的损伤，逐步在材料中形成宏观裂纹，损伤过程的最终状态是指宏观裂纹形成时的状态。在损伤力学中，损伤作为一个内变量，用来表示材料的劣化，用此内变量及荷载等参数来构成材料的本构方程、演变方程，以描述材料的劣化过程。

研究微缺陷以及这些微缺陷的发展对应力和应变状态的影响属于损伤力学的研究范围，至于宏观裂纹对应力和应变状态的影响则是断裂力学的研究对象。

材料损伤的发展常伴有某种形式的变形，因此，可以按照伴随的形变形式将不同的损伤现象分为以下几类。

（1）在常温和高温下伴有金属形变的延性塑性损伤。

（2）脆性粘塑性（或蠕变）损伤。

（3）循环荷载导致的疲劳损伤。

（4）单调加载导致的宏观脆性损伤。

（5）其他类损伤。例如氧化、腐蚀和辐照等。

对于损伤现象的宏观了解，一般可通过材料损伤的宏观测量。常用的测量内容有：

（1）弹性模量的测定。

（2）塑性特性的测定。对于延性塑性损伤可测定单调硬化特征；对于低周疲劳损伤可测定循环硬化特征。

（3）粘塑性特征的测定。对于蠕变损伤可测定其粘塑性特征。

（4）剩余寿命的测定。可按通常蠕变或疲劳中的方法进行测定。

（5）疲劳极限降低的测定。

（6）质量密度变化的测定等等。

损伤演变往往依赖于延性失效中或疲劳失效中的应力，蠕变、腐蚀或辐照过程中的时间，疲劳中的周数等变量。如果已知加载历史、材料的弹塑性本构关系以及损伤演变规律，就可以从中了解宏观裂纹出现前应力、应变场变化的整个过程，特别是可以求得结构中出现最危险的宏观裂纹所需的时间（或周次）。这就是用损伤力学进行结构设计、强度校核和结构寿命预估的现代观念。

一、复合材料损伤与损伤特征

复合材料是由两种或两种以上的材料经过物理方法组合而成的，它通常是一种多相非均质的各向异性材料。复合材料的损伤机制和损伤扩展机制的研究比起各向同性材料和一般均质各向异性材料来说都复杂得多。我们主要讨论目前工程上应用比较广泛的纤维增强叠层复合材料。从宏观现象损伤破坏模式看，纤维复合材料的基本损伤类型可分为四种：基体开裂（matrix cracking），纤维断裂（fiber fracture）、纤维与基体界面脱胶开裂（interfacial debonding）和分层（delamination）。也有把损伤分为三类的，即层内开裂（intralaminar cracking）、层间开裂（interlaminar cracking）和纤维断裂。各种损伤破坏可单独或结合在一起发生；占支配地位的一种或多种损伤破坏模式主要取决于复合材料系统中基体、纤维、界面三者的相对强度、刚度以及纤维取向，铺层方式和环境荷载等条件。

复合材料的损伤研究目前常用细观力学和连续介质损伤力学两类方法进行。前者针对典型复合材料铺设试件的代表性单元，直接模拟了损伤机制，从而大大减少了实验工作量，但在复合材料结构中应用比较困难；后一种方法是把损伤机制笼统地纳入损伤变量，从连续介质损伤力学的角度找出宏观的控制参数。虽然后一种方法比较容易应用于工程实际，但为了建立合适的损伤模型进行损伤分析，需要进行大量的实验研究工作，才能用宏观的损伤变量较真实地描述复合材料内部的损伤状态。

由于复合材料的各向异性和非均质特性，其损伤状态也具有各向异性，甚至需要用一组损伤变量 ω_j（$j=1, 2, \cdots, n$）为复合材料内部总的损伤模式个数来描述。复合材料的损伤表征，必须根据复合材料的主要损伤模式，选取适当的损伤变量。损伤变量的定义既有根据缺陷类型，如裂纹分布方式、纤维断裂情况等进行定义的，也有根据复合材料弹性常数的变化来定义的。最好的办法是根据无损检测到的损伤缺陷状况来建立损伤模型，定义与损伤缺陷有关的损伤变量，并能方便地与受损后的复合材料弹性常数等材料特性相联系，才能较好地描述复合材料内部损伤状态，预测材料的力学性能。

复合材料损伤分析过程如图 2-11 所示，首先要用合适的方法检测材料内部的损伤形貌，监测损伤扩展规律，从而建立合适的模型进行损伤分析。

受载层合板的最初损伤形式大都为基体开裂，并造成横向裂纹群。如 $[0/90/\pm45]_s$ 层合板，基体裂纹群起始于 90°层，然后是其他偏轴层，最后在 0°层也有可能产生横向基体裂纹，这是基体开裂的第一个特点。偏轴层（包括 90°层）的基体开裂的另一个特点是：在某偏轴层发生第一条横向裂纹后，荷载经过相邻层再传递回本层；在离第一条裂纹一定距离的位置其应力达到基体开裂应力后会产生第二条裂纹；依次下去，构成一个基本均匀的、近似周期性的、平行的横向裂纹群。对于给定的层合板，横向裂纹群的密度最后达到饱和。其饱和密度与加载历史无关。这种状态称为特征损伤状态（简称 CDS），一定密度的横向裂纹会引起复合材料刚度退化。刚度退化与裂纹密度增加有很好的相关性[7]。

控制复合材料最终破坏的多半是纤维断裂。对于一般层合板，0°层纤维的断裂是与相邻板层的基体开裂相关的。因为基体开裂以及界面脱胶乃至局部分层都会引起纤维应力的重新分布。当基体裂纹与纤维相交，裂纹尖端的高应力可使纤维断裂（或使界面脱胶）进而造成纤维拔出等损伤。由文献[8]可见，纤维断裂往往不仅是由于某根或某些纤维的强度较低，而主要是由于沿纤维方向的拉伸应力集中所致。此外，某些纤维断裂会使邻近纤维超载而发生断裂，这种超载还与附近基体和界面性质有关。

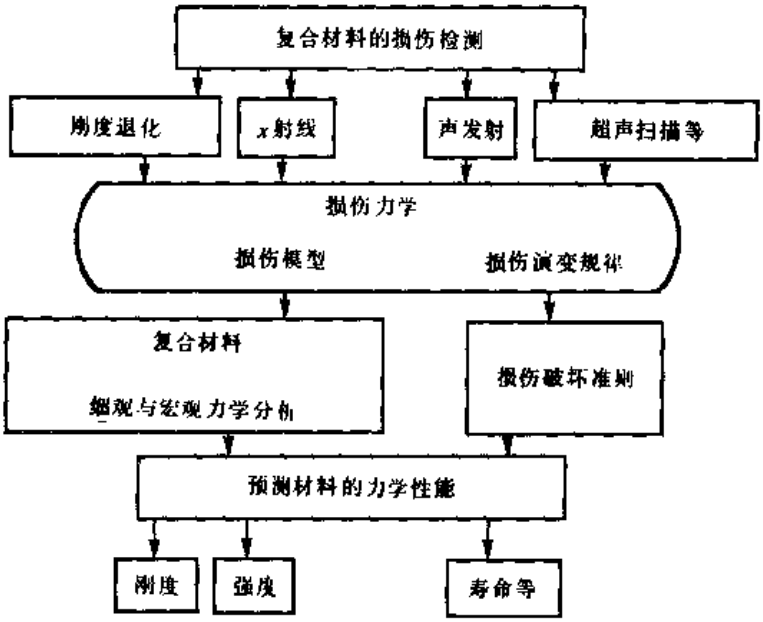


图 2-11　复合材料损伤分析流程图

一般的复合材料层合板的损伤具有局部性，即在某些特定的局部区域损伤发生、发展和连接，其中的一个局部操作区域最终变成断裂位置。这种损伤的局部性是由应力的局部增大而引起和发展的。在许多情况下，损伤的局部区域包含有基体开裂、脱胶和分层甚至纤维断裂的相互定义。因而，可将这种局部区域取为代表体元，用来计算控制强度的应力状态和选择适当的损伤破坏判据，进而让强度状态与对应的材料状态作对比来表达损伤的发展规律与趋势。

二、复合材料疲劳损伤

对于重复加载的复合材料损伤容限设计，需要了解疲劳荷载作用下复合材料的残余强度和刚度特性。循环荷载将导致复合材料损伤，如基体开裂、分层，甚至纤维断裂等现象，而且这些损伤随时间积累。因此，可以假设疲劳损伤积累达到某一临界值时复合材料发生破坏。

损伤随着循环加载而发展，直到净截面应力（损伤引起受载截面减少）达到极限强度；或材料损伤达到某一临界值，形成一个宏观裂纹。裂纹扩展达到临界裂纹尺寸时，导致复合材料发生破坏。损伤及其扩展规律与加载历史和环境条件有关。对于单循环加载，假设损伤增长率与循环应力幅度 $\Delta\sigma$、荷载比 R 以及当时的损伤值 ω 有关（忽略了加载频率、温度和湿度等环境影响），则有

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}n}=f(\Delta\sigma,R,\omega) \tag{2-65}$$

式中：N 为加载的循环次数。

设损伤破坏临界值为 ω_f，则复合材料破坏时的循环次数 N_f 为

$$N_f=\int_{\omega_0}^{\omega_f}\mathrm{d}\omega/f(\Delta\sigma,R,\omega) \tag{2-66}$$

式中：ω_0 为初始损伤值，通常取 $\omega_0=0$。由于复合材料的损伤通常引起刚度下降，假设其有效刚度为

$$E = E_0 g(\omega)$$

则：

$$\omega = g^{-1}(E/E_0) \tag{2-67}$$

式中：E_0 为无损伤的弹性模量。刚度的变化规律为

$$\frac{1}{E_0}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}N} = g'(\omega)\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}N} = g'\left[g^{-1}\left(\frac{E}{E_0}\right)\right] f\left[\Delta\sigma, R, g^{-1}\left(\frac{E}{E_0}\right)\right] \tag{2-68}$$

式中：g' 为 g 的一阶异数，g^{-1} 为 g 的逆函数。

为了得到函数 f，首先要获得 g。g 可以通过实验数据用统计方法获得，它依赖于复合材料层合板的性质，刚度的变化规律 E（N）也可由实验确定。从而

$$f(\Delta\sigma, R, \omega) = \frac{1}{g'(\omega)}\frac{1}{E_0}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}N} \tag{2-69}$$

三、复合材料统计损伤模型[9]

对于复合材料的损伤来说，由于损伤机理复杂，材料内部的微细缺陷形态、分布都具有随机性。因此，统计损伤模型也是分析复合材料损伤的有效方法之一。

（一）纤维束拉伸破坏的统计损伤分析

由于单根纤维丝承受的拉力太小，实验测试相当困难，实际测试中通常采用纤维束（有数百根纤维丝）拉伸。假设纤维束的总根数为 N，外载为 F，则作用在每根纤维上的力为

$$f_i = F/N(i = 1, 2, \cdots N) \tag{2-70}$$

设每根纤维的刚度系数均为 k_0，位移为 x，则每根纤维的受力为

$$f_i = \begin{cases} k_0 x, 0 \leqslant k_0 x \leqslant f_{Ri} \text{ 且 } x \geqslant 0 \\ 0, k_0 x > f_{Ri} \text{ 或 } x < 0 \end{cases} \tag{2-71}$$

式中：f_{Ri} 为第 i 根纤维的断裂强度。已断 n 根纤维时的平衡方程为

$$F = \sum_{i=n+1}^{n} f_i = \sum_{i=n+1}^{n} k_0 x = (N - n)k_0 x \tag{2-72}$$

将表观刚度系数记为 k，有

$$k = Nk_0 \tag{2-73}$$

定义损伤变量 ω 为

$$\omega = \frac{n}{N} \tag{2-74}$$

则荷载与位移的关系为

$$F = k(1 - \omega)x \tag{2-75}$$

实际上的纤维断裂强度为分布函数，当 N 充分大时，纤维断裂强度值位于区间 $[f_R, f_R + \mathrm{d}f_R]$ 内的纤维数与总纤维数之比为 $p(f_R)\,\mathrm{d}f_R$，式（2-72）可化为

$$F = kx\int_{kx}^{\infty} p(f_R)\mathrm{d}f_R \tag{2-76}$$

式中：$p(f_R)$ 为纤维断裂强度的概率密度。

根据式（2-71），纤维束拉伸破坏时的损伤分布规律为

$$\omega = 1 - \int_{kx}^{F_R} p(f_R)\mathrm{d}f_R = \int_{x_0}^{x} p_1(x)\mathrm{d}x \tag{2-77}$$

式中：F_0 为纤维的最小断裂强度，F_R 为纤维的最大断裂强度，x_0 为纤维初始断裂的位移值，

$p_1(x) = p(k_0 x)k_0$

剩余强度概率为

$$R(x) = 1 - \omega = \int_x^{x_f} p_1(x)\mathrm{d}x \tag{2-78}$$

式中：x_f 为纤维完全断裂时的位移值。损伤破坏准则为当

$$\omega_c = 1 \tag{2-79}$$

纤维完全断裂。

由式（2-77）可以看出，有了纤维断裂强度的分布函数之后，损伤发展规律即可确定。通常是将纤维断裂强度的分布函数假设为某区间内的均布函数、线性函数、指数函数或 Weibull 分布[10]。

（二）复合材料的统计损伤分析

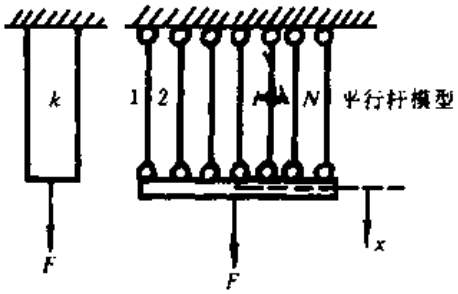


图 2-12 复合材料并联分布元素模型

Krajcinovic 利用 Iwin 讨论复合材料破坏特性的并联分布元素模型，建立了一种简单而形象的有损伤模型，用来描述复合材料简单拉伸时的损伤破坏规律。它反映了内力重新分布与损伤演变之间的相互作用。

如图 2-12 所示，假设一单向拉伸复合材料试件可由一级 N 根平行杆元来模拟，则损伤变量可定义为

$$\omega = \frac{n}{N} \tag{2-80}$$

式中：N 为杆元总数，n 为已断杆元数。

假设杆元在受力为 f_R 时发生脆断的破坏强度分布密度为 $p(f_R)$，如果各杆的刚度均为 k，则杆的受力为 kx_0 时，又 $N\to\infty$，式（2-80）定义的损伤变量可用破坏强度分布密度函数化为

$$\omega = \frac{\int_0^{kx} p(f_R)\mathrm{d}f_R}{\int_0^{F_R} p(f_R)\mathrm{d}f_R} = p(kx) = p[f_R \leqslant kx] \tag{2-81}$$

式中：F_R 为杆件的最大断裂强度。

如复合材料的破坏强度按 Weibull 分布时，损伤变量可由杆的内力表述为

$$\omega(kx) = 1 - \exp[-(kx/\theta)^m] \tag{2-82}$$

式中：m 为 Weibull 分布的形状参数，θ 为 Weibull 分布的标度参数。在一次近似的条件下，上式简化为线性关系。

$$\omega(kx) = \frac{kx}{\theta} \tag{2-83}$$

式中的有关参数可通过外力达到最大和材料损伤破坏等条件来确定。损伤破坏准则为

$$\omega_c = 1 \tag{2-84}$$

此时复合材料破坏。

如果将式（2-83）中的位移用应变表示，则有

$$\omega = C\varepsilon \tag{2-85}$$

式中：ε 为应变，C 为材料常数。损伤本构关系可表示为

$$\sigma = E(1-\omega)\varepsilon \tag{2-86}$$

式中：σ 为应力，E 为无损时材料的拉伸模量。

该方法也可推广应用于脆韧性材料，这时需要根据材料的屈服强度分布函数 f_Y 和破坏强度分布函数 f_R 对复合材料性能的影响，将损伤变量定义为有关屈服强度和破坏强度的联合概率密度函数 p（f_Y，f_R）形式。再应用上述方法可得到有关脆韧性复合材料的损伤本构关系。

第四节　短切纤维复合材料

本章前几节主要讨论了长纤维增强复合材料的基本理论。这种复合材料的一个显著特点是沿纤维轴向具有较高的强度和刚度，沿横向通常是弱的。当这种材料被用在应力能够精确地确定之处无疑是非常有利的，它能充分发挥材料的承受能力。但如果应力状态无法预测，或已知各个方向应力基本相同，不必要在某个方向上再作额外增强，而需要一种复合材料能够在平面内任意方向上具有相同的强度，即面内各向同性。目前，保证复合材料面内各向同性的有效方法是采用随机取向的短切纤维增强复合材料。在较厚的基体里，短切纤维可以是三维随机分布而呈现各向同性。本节将介绍短切纤维复合材料的一些基本理论。

一、应力传递理论

当荷载作用于复合材料，纤维并不是直接受力的。荷载直接作用于基本材料上，然后通过纤维和基体的界面传递到纤维上，因此纤维—基体界面的结构和性能对复合材料的力学性能和物理性能起着主要作用。当纤维长度比传递应力的界面区长度大得很多时，纤维末端的传递作用可忽略不计，而且纤维可以看成是连续的。在短纤维复合材料的情况下，纤维末端效应将明显地影响其增强效应，使复合材料的力学性能与纤维长度密切相关。为了对短纤维的增强机理和效应以及短纤维复合材料的力学性能有较深入的了解，必须弄清楚应力传递的原理和机制。然而，应力在材料内部的分布相当复杂，很难精确确定。这里介绍几种目前常用的计算方法。

（一）剪滞法

有关应力沿纤维长度的变化规律，最早是由 Rosen 用剪滞法来研究的[11]，这个方法假定基体只传递剪应力。图 2-13 表示短纤维的微分单元其及受力情况。用简单的平衡条件就可推出应力公式，画出沿纤维长度的应力分布图。从图 2-13 可以列出平衡条件：

$$(\pi r^2)\sigma_f + (2\pi r\mathrm{d}z)\tau = (\pi r^2)(\sigma_f + \mathrm{d}\sigma_f) \tag{2-87}$$

或

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_f}{\mathrm{d}z} = \frac{2\tau}{r} \tag{2-87a}$$

式中：σ_f 是纤维的轴向应力；τ 是纤维—基体界面上的剪应力；而 r 是纤维半径。对于等截面纤维，积分式（2-87a）可得

$$\sigma_f = \sigma_{f0} + \frac{2}{r}\int_0^z \tau\mathrm{d}z \tag{2-88}$$

式中：σ_{f0}是纤维末端的应力。在很多分析中，σ_{f0}是忽略不计的，因为纤维末端附近的基体将屈服或由于高的应力集中而使纤维末端与基体脱胶。如果 σ_{f0}可忽略，则式（2-88）可写成

$$\sigma_f = \frac{2}{r}\int_0^x \tau\mathrm{d}z \tag{2-88a}$$

如果剪应力沿纤维长度的变化规律已知，则由上式就可算出纤维应力数值。但实际上剪应力分布事先是未知的，为了求解方便，必须对纤维的周围界面和末端的材料变形作一些假

设。例如，在纤维末端上假设正应力为零；在纤维长度的中点处由于对称条件可假设剪应力为零；另外，常常假设纤维周围的基体材料是理想刚塑性体，其应力—应变关系如图 2-14 所示。

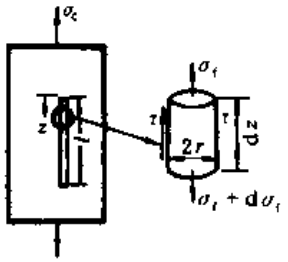


图 2-13　一根与荷载平行的短纤维微分单元的平衡状态

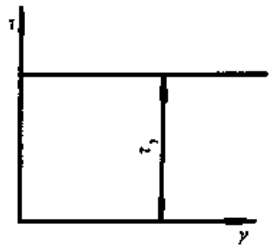


图 2-14　基体应力—应变理想模型

对于这种情况，界面剪应力沿纤维长度是常数，其值等于基体的屈服剪应力 τ_y，式（2-88a）变成

$$\sigma_f = \frac{2\tau_y z}{r} \tag{2-89}$$

对于短纤维来说，最大的纤维应力 σ_f 发生在纤维长度的中点处，即 $z=1/2$ 时，有

$$(\sigma_f)_{\max} = \tau_y \frac{l}{2} \times \frac{2}{r} = \frac{\tau_y l}{r} \tag{2-90}$$

式中：l 是纤维长度。然而纤维应力不能超过在同样的外力作用下连续纤维复合材料中的纤维上所产生的应力。对连续性纤维复合材料采用并联模型，且取连续性纤维中的应力为短切纤维中的最大应力 $(\sigma_f)_{\max}$，则根据应变协调方程有

$$(\sigma_f)_{\max} = \frac{E_f}{E_a}\sigma_a \tag{2-91}$$

式中：E_f、E_a 分别为纤维和基体的模量，σ_a 为作用在复合材料上的应力。式（2-91）中能够达到这个最大的纤维应力 $(\sigma_f)_{\max}$的最小纤维长度被定义为荷载—传递长度 l_t，它可以按式（2-90）求得

$$\frac{l_t}{d} = \frac{(\sigma_f)_{\max}}{2\tau_y} \tag{2-92}$$

式中：$d=2r$ 是纤维直径。因为 $(\sigma_f)_{\max}$是作用力 σ_a 的函数，所以荷载—传递长度 l_t 也是作用力 σ_a 的函数。这样对于一定的作用力 σ_a，短纤维中要达到式（2-91）规定的最大应力 $(\sigma_f)_{\max}$，所需的长度必须大于式（2-92）定义的传递长度 l_t。面把能够达到最大的可能的纤维应力（即纤维的极限强度 σ_{fu}）的最小长度称为临界长度 l_{cr}。由式（2-90）可知 l_{cr}与作用力 σ_a 无关，其表达式为

$$l_{cr} = \frac{d\sigma_{fu}}{2\tau_y} \tag{2-93}$$

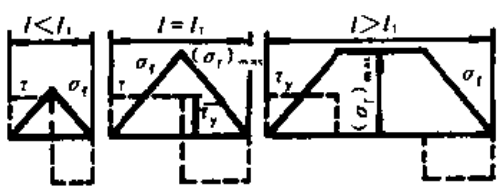


图 2-15　不同纤维长度下的纤维应力和界面剪应力的变化规律

应该注意临界长度是荷载—传递长度的最大值，超过此长度的纤维被认为已断裂。临界长度是材料的一个重要性能，它将影响到复合材料的极限性能，有时把荷载—传递长度和临界长度称为失效长度。因为在该长度上纤维承受的应力小于最大的纤维应力。不同纤维长度的纤维应力和界面剪应力的分布见图 2-15。从图中可以看到在离纤维末端的一小段长度上，其应力小

于最大纤维应力。但是要指出，如果纤维长度比载荷—传递长度要长得多的话，则复合材料的性能就趋于连续纤维增强的复合材料的性能。

图 2-15 所示的应力分布是近似的，因为那是在假设基体材料是理想刚塑性而得到的。

实际上，大多数基体材料是弹—塑性的。当然，剪滞法不象弹性力学和有限元法那样严格，但是它还是提供了一个简单的分析方法来获得一个解答复杂问题的某些启示。

（二）剪切滑移法

为了考虑纤维末端所传递的荷载，用图 2-16 所示的模型来分析应力传递。该模型在基体里引进了部分的轴向作用荷载。由图 2-16 的体积单元沿 x 方向的平衡条件得

$$A_{ft}\sigma_f(x) + A_m\sigma_m(x) = A_c\sigma \qquad (2\text{-}94)$$

式中：A_f、A_m、A_c 分别为纤维、基体、复合材料的横断面积，对图 2-16 所示直径为 d_a 圆柱单元体模型，$A_c=\pi d_a^2/4$，$A_m=A_c-A_f$。

由图 2-16 微段 dx 上的平衡条件得

$$\tau(x) + \frac{A_f}{u_f}\frac{\mathrm{d}\sigma_f(x)}{\mathrm{d}x} = 0 \qquad (2\text{-}95)$$

式中：u_f 表示纤维的周长，$u_f=\pi d_f$，d_f 为纤维直径。

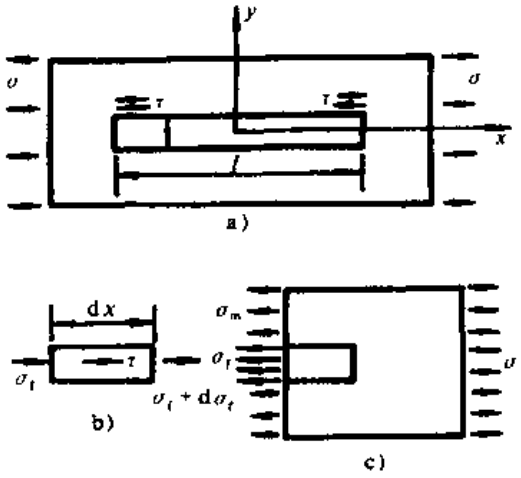


图 2-16 剪切滑移法计算模型

剪切滑移法考虑允许纤维与基体的界面上产生一定的相对滑移。设 dx 微段的相对滑移为 ds，则：

$$\mathrm{d}s = \mathrm{d}w_f - \mathrm{d}w_m = [\varepsilon_f(x) - \varepsilon_m(x)]\mathrm{d}x \qquad (2\text{-}96)$$

式中：$w_f(x)$，$w_m(x)$ 分别是 x 截面处纤维与基体的位移。如果纤维和基体是弹性材料，其本构关系为

$$\left.\begin{aligned}\sigma_f &= E_f\varepsilon_f(x)\\ \sigma_m &= E_m\varepsilon_m(x)\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}97)$$

再假定纤维与基体界面上的粘接滑移关系满足

$$\tau(x) = \begin{cases} ks(x) = k[w_f(x) - w_m(x)] & \tau(x) \leqslant \tau_u \\ \tau_i & \tau(x) > \tau_u \end{cases} \qquad (2\text{-}98)$$

式中：k 为滑移模量；τ_u，τ_i 分别为最大粘接强度和摩阻粘结强度。

下面分 $\tau(l/2) \leqslant \tau_u$ 和 $\tau(l/2) \geqslant \tau_u$ 两种情况来讨论 $\sigma_f(x)$ 及 $\tau(x)$ 的求解。

1. $\tau(l/2) \leqslant \tau_u$（弹性应力传递）

对式（2-98）两边微分得

$$\frac{\mathrm{d}\tau(x)}{\mathrm{d}x} = k\frac{\mathrm{d}s(x)}{\mathrm{d}x} \qquad (2\text{-}99)$$

将式（2-96）代入式（2-99）得

$$\frac{\mathrm{d}\tau(x)}{\mathrm{d}x} = k[\varepsilon_f(x) - \varepsilon_m(x)] \qquad (2\text{-}100)$$

综合考虑式（2-97）和式（2-100）有

$$\frac{\mathrm{d}\tau(x)}{\mathrm{d}x}=k\left[\frac{\sigma_f(x)}{E_f}-\frac{\sigma_m(x)}{E_m}\right] \tag{2-101}$$

再考虑式（2-94）有

$$\sigma_m(x)=\frac{A_C}{A_M}\left[\sigma-\frac{A_f}{A_c}\sigma_f(x)\right]=\frac{1}{V_m}[\sigma-V_f\sigma_f(x)] \tag{2-102}$$

将式（2-102）代入式（2-101），并注意式（2-95）可得 σ_f 的微分方程式

$$\frac{\mathrm{d}^2\sigma_f}{\mathrm{d}x^2}+k_1^2\sigma_f(x)=k_2^2 \tag{2-103}$$

式中：

$$k_1^2=k\frac{u_f}{A_fE_f}\left(1+n\frac{V_f}{1-V_f}\right)$$

$$k_2^2=k\frac{u_f}{V_{mf}E_mA_m}\sigma,n=\frac{E_f}{E_m}$$

上式的解具有下列形式

$$\left.\begin{aligned}\sigma_f(x)&=A\sin k_1x+B\cos k_1x+\frac{k_2^2}{k_1^2}\\ \tau(x)&=\frac{-A_fk_1}{U_f}[A\cos(k_1x)-B\sin(k_1x)]\end{aligned}\right\} \tag{2-104}$$

式中：A、B 为待定系数。

考虑剪力 $\tau(x)$ 的反对称性 $\tau(0)=0$，有 $A=0$，同时考虑纤维末端与基体的不同连续方式来确定式中的另一个待定系数 B，从而确定纤维末端的应力传递效应。例如，在纤维末端完全与基体隔开时，可假定 $\sigma_f(l/2)=0$，代入式（2-104）就得到了一般剪切滑移法解。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_f(x)&=\frac{n\sigma}{1+(n-1)V_f}\left(1-\frac{\cos k_1x}{\cos k_1\dfrac{l}{2}}\right)\\ \tau(x)&=\frac{-A_fk_1}{U_f}\frac{n\sigma}{1+(n-1)V_f}\frac{\sin k_1x}{\cos k_1\dfrac{l}{2}}\end{aligned}\right\} \tag{2-105}$$

但是由于纤维末端与基体之间应力效应的复杂性，有时纤维末端与基体之间可能是完全粘合的。这样可以假定 $\sigma_f(l/2)=\sigma$ 来确定此时式（2-104）中的待定系数 B，而得到一组与式（2-105）完全不同的应力解。

2. $\tau(l/2)>\tau_u$（弹性摩阻应力传递）

当 $\tau(l/2)>\tau_u$ 时，考虑图 2-16 所示的模型。假定纤维在原点的 $ml/2$ 范围内为弹性粘接，在 $ml/2\leqslant x\leqslant l/2$ 内的界面摩阻粘结强度 τ_r 为常数，在这种情况下，前面得到的弹性解式（2-104）经适当修改后可用于弹性摩阻应力传递情况，因而有：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_f(x)&=A^*\sin k_1x+B\cos k_1x+\frac{k_2^2}{k_1^2}\\ \tau(x)&=\frac{-A_fk_1}{U_f}[A^*\cos(k_1x)-B\sin(k_1x)]\end{aligned}\right\}0\leqslant x\leqslant m\frac{l}{2}$$

$$\left.\begin{aligned}\sigma_f(x) &= \frac{U_f}{A_f}\tau_i x + \sigma\left(\frac{l}{2}\right) - \frac{U_f}{A_f}\tau_i \frac{l}{2}\\ \tau(x) &= -\tau_i\end{aligned}\right\} \frac{ml}{2} \leqslant x \leqslant \frac{l}{2} \tag{2-106}$$

式（2-106）应满足的边界条件为

$$\tau(0) = 0 \qquad \sigma\left(\frac{ml}{2}\right) = \sigma^* = \frac{U_f}{A_f}\left(\frac{ml}{2}\right) + \sigma\left(\frac{l}{2}\right) - \frac{U_f}{A_f}\tau_i \frac{l}{2} \tag{2-107}$$

式中的 m 可由 $x=ml/2$ 处的 τ（x）等于界面剪切强度（$-\tau_u$）得到与 B^* 的关系表达式。B^* 的确定依赖纤维末端的正应力传递形式 σ（$l/2$）值的选定。同弹性应力传递类似，当认为纤维末端与基体无正应力传递时，σ（$l/2$）$=0$，σ（$ml/2$）$=\sigma^*=u_f\tau_i\dfrac{l\ (1-m)}{2}$，此时得 $B^*=\dfrac{\sigma^*-k_2^2/k_1^2}{\cos\ (k_1 ml/2)}$，显然不管 B^* 如何取值，由剪应力函数的反对称性均可得 $A^*=0$。

（三）广义剪滞法

在以上所研究的材料模型上，其作用力均与纤维平行。为了研究杂乱走向的复合材料，要研究在材料模型上，其作用力与纤维成一个角度的情况，Chon-Sun 用图 2-17 所示的体积单元来分析应力传递机制，文献[13]并称这种剪滞法为普遍剪滞法。该模型有一个圆柱形纤维，外面围以一层树脂套。假设其余的外围材料具有该复合材料的平均特性。普遍剪滞法作了如下假设：

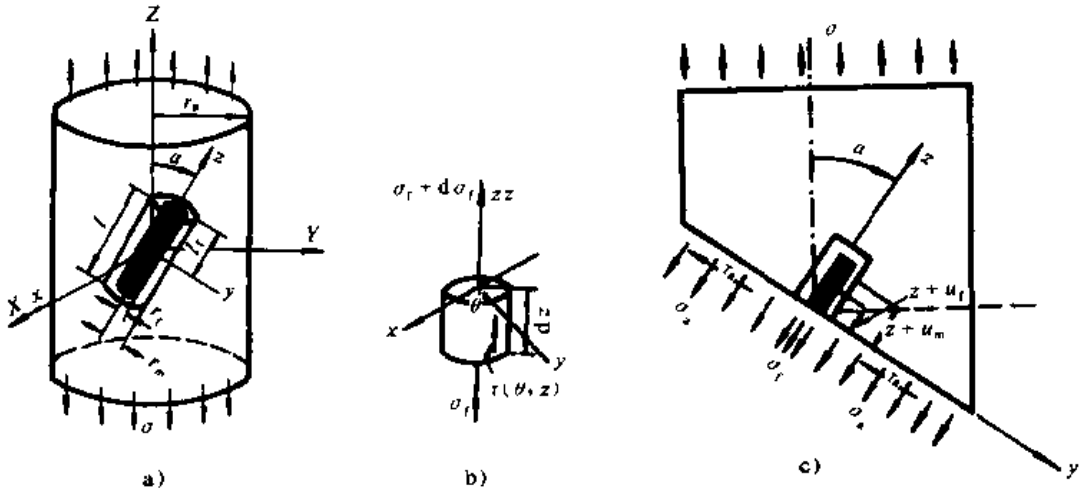


图 2-17　广义剪滞法计算模型

（1）在界面上，纤维和基体之间的结合是完好的；

（2）在纤维方向上，基体中的正应力比在纤维中的应力小得多；

（3）荷载是由基体材料通过界面上的剪应力来传递的；

（4）纤维不会屈曲；

（5）最近的相邻纤维对沿着树脂套的应力场无显著干扰。

在图 2-17b）所示的 dz 微段平衡条件下有

$$\int_0^{2\pi} \tau \mathrm{d}\theta + \pi r_f \frac{\mathrm{d}\sigma_f}{\mathrm{d}z} = 0 \tag{2-108}$$

式中假定 σ_r 与 θ 和 r 无关。对于长细比很高的纤维来说，假定 σ_f 与 θ 和 r 无关是合理的。

从总体的 z 向平衡条件，可以按图 2-17c）写成

$$r_f^2\sigma_f + (r_a^2/\cos\alpha - r_f^2)\sigma_a = \sigma r_a^2\cos\alpha \tag{2-109}$$

在基体中的剪切应变 γ_m，可根据纤维和平均的复合材料的相对位移来确定，按图 2-17c 可以写成

$$u_a - u_f = r_m(r_m - r_f) \tag{2-110}$$

式中：u_a，u_f 分别为复合材料和纤维沿纤维方向的位移。取上式对 z 的一阶导数，然后代入应力--应变关系式，则上式可改写成

$$\frac{\sigma_a}{E_a} - \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{r_m - r_f}{G_m}\left(\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}z}\right) \tag{2-111}$$

式中，复合材料的平均模量 E_a 可以从实验中测定，也可以根据细观力学方法来确定。从式中可以看出，σ_a，σ_f 都与 θ 无关，所以可以肯定 $\left(\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}z}\right)$ 与 θ 也无关。因此可以写成

$$\int_0^{2\pi}\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}z}\mathrm{d}\theta = 2\pi\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}z} \tag{2-112}$$

将此式代入式（2-108）可得：

$$\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}z} + \frac{r_f}{2}\frac{\mathrm{d}^2\sigma_f}{\mathrm{d}z^2} = 0 \tag{2-113}$$

结合式（2-109）、式（2-111）和式（2-113），消去 τ 和 σ_a，最后推导出 σ_f 的下列微分方程式

$$\frac{\mathrm{d}^2\sigma_f}{\mathrm{d}z^2} - \eta^2\sigma_f = -\xi^2 \tag{2-114}$$

式中：

$$\left.\begin{aligned}\xi^2 &= \frac{2\sigma G_m r_a^2\cos^2\alpha}{E_a r_f(r_m - r_f)(r_a^2 - r_f^2\cos\alpha)}\\ \text{和 } \eta^2 &= \frac{2G_m}{(r_m - r_f)r_f}\left[\frac{r_f^2\cos\alpha}{E_a(r_a^2 - r_f^2\cos\alpha)} + \frac{1}{E_f}\right]\end{aligned}\right\} \tag{2-115}$$

如果考虑到 $r_f \leqslant r_a$，则上式可写成：

$$\left.\begin{aligned}\xi^2 &= \frac{2\sigma G_m\cos^2\alpha}{E_a r_f(r_m - r_f)}\\ \eta^2 &= \frac{2G_m}{E_f(r_m - r_f)r_f}\end{aligned}\right\} \tag{2-116}$$

式（2-114）的解具有下列形式

$$\sigma_r = A\sinh(\eta z) + B\cosh\eta z + \xi^2/\eta^2 \tag{2-117}$$

为了确定剪应力 τ，将式（2-117）代入式（2-113）并求解，则得

$$\tau = Q\sinh\eta z + C \tag{2-118}$$

式中：

$$Q = \frac{G_m\xi^2}{\eta^3(r_m - r_f)\cosh\eta l_f}\left[\frac{r_f^2\cos\alpha}{E_a(r_a^2 - r_f^2\cos\alpha)} + \frac{1}{E_f}\right] \tag{2-119}$$

考虑到 $r_f \leqslant r_a$

$$Q = \frac{G_m\xi^2}{E_f\eta^3(r_m - r_f)\cosh\eta l_f} \tag{2-120}$$

至于 C 的确定，可用 $z=0$ 处的剪应力 τ 的边界条件按下式求得参见文献[13],[14]：

$$C = -\sigma\sin\alpha\cos\alpha\sin\alpha \tag{2-121}$$

所以，用广义剪滞法研究应力传递时，界面剪力为：

$$\tau = Q\sinh\eta z - \sigma\sin\alpha\cos\alpha\sin\alpha \tag{2-122}$$

二、复合材料的等效弹性模量

（一）复合理论中的平均应力与平均应变

复合材料实际上是纤维（粒子）、基体等组成的不均匀各向异性材料。但是目前在复合材料力学中是把单向复合材料单元从宏观上看成是均匀的各向同性材料来处理的，在弹性力学方法分析中，通常选取材料微元体上某一点来分析它的应力应变状态。那么这个点在复合材料上是哪个点？它是在纤维上还是在基本上的点？因此，对于复合材料上任一点上宏观问题的应力应变关系该如何处理，理论上就先得给予解决。于是，引入平均应力与平均应变的概念显然十分重要。

在复合材料上取包含某点的一个非无限小的微元体，在此微元体中仍应包括含有纤维与基体成分在内，设在此微元体内的应力为 σ，应变为 ε，则复合材料的复合应力 $\bar{\sigma}_c$ 与复合应变 $\bar{\varepsilon}_c$ 可定义为：

$$\bar{\sigma}_c = \frac{1}{V_c}\int_{V_c}\sigma dV = \frac{1}{V_c}\left[\int_{V_c}\sigma dV + \int_{V_m}\sigma dV\right], \bar{\varepsilon}_c = \frac{1}{V_c}\int_{V_c}\varepsilon dV = \frac{1}{V_c}\left[\int_{V_c}\varepsilon dV + \int_{V_m}\varepsilon dV\right] \tag{2-123}$$

式中：V_c 为复合材料微元体体积，V_f 为该体积内纤维所占的体积部分，V_m 为基体体积。引入体积平均应力 $\bar{\sigma}_f$，$\bar{\sigma}_m$ 与体积平均应变 $\bar{\varepsilon}_f$，$\bar{\varepsilon}_m$，它们可分别表示为：

$$\bar{\sigma}_f = \frac{\int_{V_f}\sigma dV}{V_f}, \bar{\sigma}_m = \frac{\int_{V_m}\sigma dV}{V_m}, \bar{\varepsilon}_f = \frac{\int_{V_f}\varepsilon dV}{V_f}, \bar{\varepsilon}_m = \frac{\int_{V_f}\varepsilon dV}{V_m} \tag{2-124}$$

则式（2-123）可写成

$$\bar{\sigma}_c = V_f\bar{\sigma}_f + V_m\bar{\sigma}_m, \bar{\varepsilon}_c = V_f\bar{\varepsilon}_f + V_f\bar{\varepsilon}_m \tag{2-125}$$

因此，在复合材料力学中复合应力与复合应变都是指复合体积上的平均应力与平均应变。

（二）复合材料的等效弹性模量

为了便于复合材料的力学分析，对于非均质各向异性材料，往往需要将其转为统计均匀的材料形式，这种处理方式在工程应用中是受欢迎的。例如，由随机分布的颗粒增强的复合材料就是一种统计均匀的各向同性复合材料。

下面介绍以张量形式给出的等效弹性模量的计算方法。

为了定义复合材料的等效弹性模量，考虑如下两类均匀边界条件：

$$u_i(S) = \varepsilon^0_{ij}x_j \text{ 和 } T_i(S) = \sigma^0_{ij}n_j \tag{2-126}$$

这里 $u_i(S)$ 与 $T_i(S)$ 为边界上的位移矢量与应力矢量，ε^0_{ij} 与 σ^0_{ij} 是常应变张量与常应力张量。在远场均匀边界条件下，除了边界点附近可能有扰动存在，统计均匀的复合材料的应力场与应变场也是统计均匀的。由于边界点所占的体积与整个复合材料的体积相比很小，我们可以认为所有场量在复合材料的代表性单元内的体积平均值就等于它们在复合材料内的体积平均值。

复合材料的等效弹性常数张量 C^*_{ijkl} 与等效柔度张量 S^*_{ijkl} 分别定义为

$$\bar{\sigma}_{ij} = C^*_{ijkl}\bar{\varepsilon}_{kl}, \bar{\varepsilon}_{ij} = S^*_{ijkl}\bar{\sigma}_{kl} \tag{2-127}$$

其中 $\bar{\sigma}_{ij}$ 与 $\bar{\varepsilon}_{ij}$ 为代表性单元内应力与应变的体积平均值。利用散度定理容易证明，在给定边界条件式（2-126）下，$\bar{\sigma}_{ij}$ 与 $\bar{\varepsilon}_{ij}$ 分别等于 σ^0_{ij} 与 ε^0_{ij}，这样，就有

$$C^*_{ijkl}\varepsilon^0_{kl} = V_0\bar{\sigma}^{(0)}_{ij} + \sum_{r=1}^{n} V_r\bar{\sigma}^{(r)}_{ij} = C^{(0)}_{ijkl}\varepsilon^0_{kl} + \sum_{r=1}^{n} V_r\left(C^{(r)}_{ijkl} - C^{(0)}_{ijkl}\right)\bar{\varepsilon}_{kl} \tag{2-128}$$

$$S^*_{ijkl}\sigma^0_{kl} = V_0\bar{\varepsilon}^{(0)}_{ij} + \sum_{r=1}^{n} V_r\bar{\varepsilon}^{(r)}_{ij} = S^{(0)}_{ijkl}\sigma^0_{kl} + \sum_{r=1}^{n} V_r\left(S^{(r)}_{ijkl} - S^{(0)}_{ijkl}\right)\bar{\sigma}_{kl} \tag{2-129}$$

式中：上标（0）代表复合材料的基体相，（r）代表复合材料第 r 种增强相，V_0 与 V_r 分别为基体相与第 r 增强相的体积比率，它们满足 $V_0+\sum_{r=1}^{n}V_r=1$。式（2-128）与式（2-129）表明，为确定等效弹性性质，需要先求得各增强相的平均应变 $\bar{\varepsilon}^{(r)}_{ij}$ 或平均应力 $\bar{\sigma}^{(r)}_{ij}$。一般来说这是一个非常困难的任务，为此，必须引入一定的近似与简化。

作为一个例子，考察一个两相各向同性材料。将变形分解为体积变形与剪切变形两个部分，式（2-128）成为

$$\left.\begin{aligned}\frac{K^* - K_0}{K_1 - K_0} &= V_1\frac{\bar{\varepsilon}^{(1)}_{KK}}{\varepsilon^0_{KK}}\\ \frac{G^* - G_0}{G_1 - G_0} &= V_1\frac{\bar{\varepsilon}^{(1)}_{ij}}{\varepsilon^0_{ij}}\end{aligned}\right\} \tag{2-130}$$

式中：K 为体积弹性模量，G 为剪切弹性模量，$\varepsilon^{1(1)}_{ij}$ 与 $\varepsilon^{0'}_{ij}$ 为相应的应变偏量。

1. 沃依特（Voigt）近似与路斯（Reuss）近似

计算复合材料等效弹性模量的最为简单的方法是所谓的混合律。混合律的基础就是沃依特的等应变假设与路斯的等应力假设。沃依特等应变假设认为，根据边界条件式（2-126）复合材料内的应变是均匀的，其值为 ε^0_{ij}。路斯的等应力假设则认为由边界条件式（2-126），复合材料内的应力是均匀的，其值为 σ^0_{ij}。

设复合材料的各组相都是各向同性的，给定的远场应变为 ε^0_{12}。根据 Voigt 假设以及式（2-128），我们得到复合材料的等效剪切模量为

$$G^* = \sum_{r=0}^{n} V_rG_r \tag{2-131}$$

式中：G_r 为第 r 相的剪切模量。同样，在给定 σ^0_{12} 的情况下，根据路斯假设以及式（2-129），我们有

$$G^* = \left(\sum_{r=0}^{n} V_r/G_r\right)^{-1} \tag{2-132}$$

一般来说，混合律给出的解是比较粗糙的。从能量原理出发容易证明沃依特近似解与路斯近似解分别对应于真实弹性解的上下限。

根据位移边界条件式（2-126），代表性单元的总势能为

$$\Pi = \frac{1}{2}C^*_{ijkl}\varepsilon^0_{ij}\varepsilon^0_{kl}V \tag{2-133}$$

根据等应变假设，总势能的 Voigt 近似值为

$$\Pi_V = \frac{1}{2}C^V_{ijkl}\varepsilon^0_{ij}\varepsilon^0_{kl}V \tag{2-134}$$

其中 $$C^V_{ijkl} = \frac{1}{V}\int_V C_{ijkl}\mathrm{d}V = \sum_{r=0}^{n} V_rC^{(r)}_{ijkl} \tag{2-135}$$

根据最小势能原理，我们有

$$\frac{1}{2}(C^*_{ijkl}-C^V_{ijkl})\varepsilon^0_{ij}\varepsilon^0_{kl}\leqslant 0 \tag{2-136}$$

因为 ε^0_{ij}可以任意给定，于是有 $C^*_{ijkl}\leqslant C^V_{ijkl}$。

同理，根据应力边界条件式（2-126），代表性单元的余能为

$$\Pi_C=\frac{1}{2}S^*_{ijkl}\sigma^0_{ij}\sigma^0_{kl}V \tag{2-137}$$

在等应力假设下，余能的路斯近似值为

$$\Pi_R=\frac{1}{2}S^R_{ijkl}\sigma^0_{ij}\sigma^0_{kl}V \tag{2-138}$$

其中

$$S^R_{ijkl}=\frac{1}{V}\int_V S_{ijkl}\mathrm{d}V=\sum_{r=0}^{n}V_rS^{(r)}_{ijkl} \tag{2-139}$$

根据最小余能原理就可以得到

$$S^*_{ijkl}\leqslant S^R_{ijkl} \tag{2-140}$$

即

$$C^*_{ijkl}\geqslant C^R_{ijkl} \tag{2-141}$$

其中

$$C^R_{ijkl}=(S^R_{ijkl})^{-1} \tag{2-142}$$

2. 艾希尔拜弹性夹杂问题

由前所述，复合材料等效弹性模量的计算可以归结为在远场均匀边界条件下求其内部各离散相的应力与应变的平均值的问题。复合材料的离散相可以看作为嵌入弹性基体的夹杂。因此，50 年代英国物理学家艾希尔拜（Eshelby）关于弹性夹杂问题的解就可以成为研究等效弹性模量计算的基础。这里简要介绍 Eshelby 的工作参见文献[15]，文献[16]。

1）Eshelby 等效包容体理论

对短纤维复合材料作细观力学分析时，通常取用的分析模型是一个短纤维埋藏在无限的基体里，称这个纤维叫包容体，如图（2-18）所示。用 Ω 表示包容体所占的域，D-Ω 表示 Ω 外的无限基体空间。包容体和基体为不同材料时，称这种包容体为异质包容体，假定包容体和外围基体是两种均匀各向同性体，现在要对这样的力学模量进行分析。Eshelby 提出了用等效包容体理论来解决这个计算问题。

等效包容体理论是用一个尺寸外形都和原包容体一致，但将包容体材料改成与其外围基体相同，同时对改质后的包容体作些物理上的处理，用它来代替原来的包容体，这种与基体材料一致的包容体称为同质包容体。对于同质包容体的物体（图 2-18），这时包容体域 Ω 和外围基体域 D-Ω 都是和原来基体相同的材料，用 C^0_{ijkl}表示它们的弹性张量。

先设想将 Ω 取出来，并让它产生无约束的变形，也即是赋予它自由应变 ε^*_{kl}，称这 ε^*_{kl}为特征应变。显然，这样使包容体的外形尺寸发生了变化。然后在这个变了形的包容体边界上施加边界面力 P_{ij}使它又恢复到原来的形式尺寸，并把它放回到基体中的原来位置。这时只要在图 2-19 包容体边界上加上反号的（P_{ij}），如图 2-19 所示，就完成了对同质包容体的处理。这时整个物体上没有外力作用，但包容体具有特征应变 ε^*_{kl}。这个应变 ε^*_{kl}会受到其周围界质的约束，设这个约束使包容体及周转介质中分别出现一种干扰应变 ε^0_{kl}，见图 2-19。这时同质包容体的应力将是

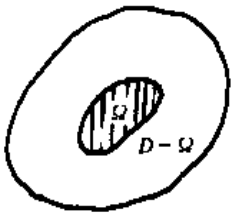


图 2-18 包容体模型

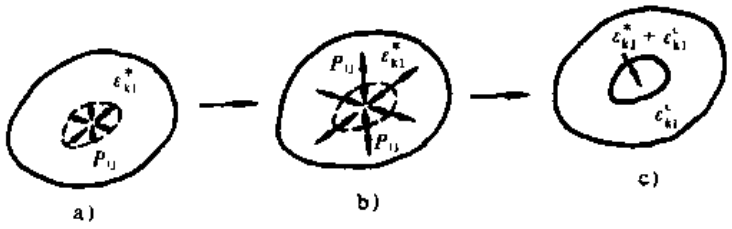


图 2-19 同质包容体

$$\sigma_{ij} = C^*_{ijkl}(\varepsilon^c_{kl} - \varepsilon^*_{kl}) \tag{2-143}$$

基体的应力

$$\sigma_{ij} = C^0_{ijkl}\varepsilon^c_{kl} \tag{2-144}$$

如果这时在物体无限远处施加均匀应变 ε^0_{kl}，则得同质包容体应力

$$\sigma_{ij} = C^0_{ijkl}(\varepsilon^0_{kl} + \varepsilon^c_{kl} - \varepsilon^*_{kl}) \tag{2-145}$$

基体应力

$$\sigma_{ij} = C^0_{ijkl}(\varepsilon^0_{kl} + \varepsilon^c_{kl}) \tag{2-146}$$

Eshelby 曾对同质包容体为椭球形的情况，设特征应变为常量时，求出了同质包容体的上述干扰应变为

$$\varepsilon^c_{ij} = S_{ijkl}\varepsilon^*_{kl} \tag{2-147}$$

通常称 S_{ijkl} 为 Eshelby 张量，Eshelby 张量有如下的对称关系[18] $S_{ijkl}=S_{jikl}=S_{ijlk}$

具体的表达式为

$$\left.\begin{aligned}
S_{1111} &= \frac{3}{8\pi(1-\nu_0)}a_1^2 I_{11} + \frac{1-2\nu_0}{8\pi(1-\nu_0)}I_1 \\
S_{1122} &= \frac{1}{8\pi(1-\nu_0)}a_2^2 I_{12} - \frac{1-2\nu_0}{8\pi(1-\nu_0)}I_1 \\
S_{1133} &= \frac{1}{8\pi(1-\nu_0)}a_3^2 I_{13} - \frac{1-2\nu_0}{8\pi(1-\nu_0)}I_1 \\
S_{1212} &= \frac{a_1^2+a_2^2}{16\pi(1-\nu_0)}I_{12} + \frac{1-2\nu_0}{16\pi(1-\nu_0)}(I_1+I_2)
\end{aligned}\right\} \tag{2-148}$$

循环 1、2、3 给出其他非零项。不能由循环给出的项，均为零，如 $S_{1112}=S_{1223}=S_{1232}=0$。

式 (2-148) 中

$$I_i = 2\pi a_1 a_2 a_3 \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}S}{(a_i^2+S)\Delta S} \quad I_{ij} = 2\pi a_1 a_2 a_3 \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}S}{(a_i^2+S)(a_j^2+S)\Delta S} \tag{2-149}$$

其中 a_1、a_2 与 a_3 分别为椭球的三个主半轴长，而

$$\Delta S = (a_1^2+S)^{1/2}(a_2^2+S)^{1/2}(a_3^2+S)^{1/2} \tag{2-150}$$

对于异质包容体的物体。令无限基体有异质椭球形包容体，设包容体的弹性张量为 C_{ijkl}，这时如无限远处基体的均匀应变为 ε^0_{kl}，则异质包容体的应力就应为

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}(\varepsilon^0_{kl} - \varepsilon^c_{kl}) \tag{2-151}$$

其中 ε^c_{kl} 就是由于包容体异质而出现的干扰应变。

Eshelby 提出将椭球形的异质包容体改成同尺度的和基体材料一致的同质包容体。选择这同质包容体的特征应变，使其按式 (2-145) 计算的应力和按式 (2-151) 计算的异质包容体相等，即令

$$C_{ijkl}(\varepsilon_{kl}^{0}+\varepsilon_{kl}^{c})=C_{ijkl}^{0}(\varepsilon_{ijkl}^{0}+\varepsilon_{kl}^{c}-\varepsilon_{kl}^{*}) \tag{2-152}$$

对椭球形包容体，按此条件连同式（2-147）即可解出 ε_{kl}^{*}，并从式（2-147）得出 ε_{kl}^{c}，它们都以 ε_{kl}^{0} 表示。

上面处理问题的手段是将异质包容体化作同质包容体来分析，称之为等效包容体理论。

2）等效弹性模量的摩利—塔纳卡计算方法

1973 年摩利（*Mori*）与塔纳卡（Tanaka）对非均质材料的等效弹性模量提出了一个近似计算方法。由于这个方法运算简单同时在一定程度上计及了复合材料中夹杂相之间的相互作用，近年来受到广泛的应用[17]。

设给定的复合材料在其边界上受到远场均匀的应力 $\bar{\sigma}$ 的作用。另外有一形状相同的均质材料，其弹性性质与上述复合材料的基体的弹性性质相同，在同样的外力作用下它的应变为

$$\varepsilon^{0}=L_{0}^{-1}\bar{\sigma} \tag{2-153}$$

L_0 是基体材料的弹性常量张量，L_0^{-1} 为它的逆。由于分布的夹杂相的存在，实际复合材料基体的平均应变将不同于 ε_0。设其为 $\varepsilon_0+\bar{\varepsilon}$。这样，基体中的平均应力将为

$$\bar{\sigma}^{(0)}=\bar{\sigma}+\hat{\sigma}=L_{0}(\varepsilon_{0}+\hat{\varepsilon}) \tag{2-154}$$

显然基体中应力的扰动部分为

$$\tilde{\sigma}=L_{0}\tilde{\varepsilon} \tag{2-155}$$

由于材料弹性性质的差别，在外力场下复合材料夹杂相内的平均应力与平均应变又不同于基体内的相应平均值，它们的差值为 $\bar{\sigma}^{pt}$ 与 $\bar{\varepsilon}^{pt}$。使

$$\bar{\sigma}^{(1)}=\bar{\sigma}+\tilde{\sigma}+\bar{\sigma}^{pt}=L_{1}(\varepsilon^{0}+\tilde{\varepsilon}+\bar{\varepsilon}^{pt})=L_{0}(\varepsilon^{0}+\tilde{\varepsilon}+\bar{\varepsilon}^{pt}-\varepsilon^{*}) \tag{2-156}$$

L_1 为夹杂相的弹性常数张量，ε^* 为等效本征应变。

Mori 和 Tanaka 认为，应变平均扰动值与本征应变 ε^* 的关系可以沿用 Eshelby 关系。

$$\bar{\varepsilon}^{pt}=S\varepsilon^{*} \tag{2-157}$$

其中 S 为 Eshelby 张量，它与基体的弹性性质及夹杂的形状有关。由式（2-154），式（2-156），式（2-157）可求得

$$\bar{\sigma}^{pt}=L_{0}(\bar{\varepsilon}^{pt}-\varepsilon^{*})=L_{0}(S-I)\varepsilon^{*} \tag{2-158}$$

其中 I 为四阶单位张量。

注意到复合材料的体积平均应力应等于其远场均匀应力 $\bar{\sigma}$，即

$$\bar{\sigma}=(1-V_{1})\bar{\sigma}^{(0)}+V_{1}\bar{\sigma}^{(1)} \tag{2-159}$$

式中：V_1 为夹杂相的体积比率。利用式（2-154），式（2-156）可得：

$$\tilde{\sigma}=-V_{1}\bar{\sigma}^{pt} \tag{2-160}$$

或者

$$\tilde{\varepsilon}=-V_{1}(\bar{\varepsilon}^{pt}-\varepsilon^{*})=-V_{1}(S-I)\varepsilon^{*} \tag{2-161}$$

将式（2-157），式（2-161）代入式（2-156）可以解得

其中

$$\varepsilon^{*}=A\varepsilon^{0} \tag{2-162}$$

$$A=\{L_{0}+(L_{1}-L_{0})[V_{1}I+(1-V_{1})S]\}^{-1}(L_{0}-L_{1}) \tag{2-163}$$

另一方面，复合材料的平均应变为

$$\bar{\varepsilon}=(1-V_{1})\bar{\varepsilon}^{(0)}+V_{1}\bar{\varepsilon}^{(1)}=(I+V_{1}A)L_{0}^{-1}\bar{\sigma} \tag{2-164}$$

于是就得到复合材料的等效弹性模量为

$$L=L_{0}(I+V_{1}A)^{-1} \tag{2-165}$$

以球形颗粒增强复合材料为例，由上述 M-T 方法得到的等效体积模量 K 与等效剪切模量 μ 为

$$\left.\begin{aligned}\frac{k}{k_0}&=1+\frac{V_1(k_1-k_0)}{k_0+\alpha(1-V_1)(k_1-k_0)}\\ \frac{\mu}{\mu_0}&=1+\frac{V_1(\mu_1-\mu_0)}{\mu_0+\beta(1-V_1)(\mu_1-\mu_0)}\end{aligned}\right\}\tag{2-166}$$

其中

$$\alpha=\frac{1}{3}\left(\frac{1+\gamma_0}{1-\gamma_0}\right),\beta=\frac{2}{15}\cdot\frac{4-5\gamma_0}{1-\gamma_0}\tag{2-167}$$

这里 k_1 与 μ_1 为夹杂相的体积弹性模量与剪切弹性模量，K_0，μ_0 与 ν_0 分别为基体的体积弹性模量、剪切弹性模量与泊松比。

三、短纤维复合材料的强度预报

（一）单向短纤维复合材料的混合律预报强度

混合律对单向短纤维复合材料来说，应稍加改变。因为公式

$$\sigma_c=\bar{\sigma}_fV_f+\sigma_mV_m\tag{2-168}$$

中的 $\bar{\sigma}_f$ 应该是纤维上正应力的平均值。此时可按下面的公式计算

$$\bar{\sigma}=\frac{1}{l}\int_0^l\sigma_f\mathrm{d}z\tag{2-169}$$

如果在纤维末端附加的正应力 σ_f 是线性分布的，则 $\bar{\sigma}_f$ 可由下式确定：

$$\left.\begin{aligned}\bar{\sigma}_f&=\frac{1}{2}(\sigma_f)_{\max}=\frac{\tau_yl}{d}(l<l_t)\\ \bar{\sigma}_f&=(\sigma_f)_{\max}\left(1-\frac{l_t}{2l}\right)(l>l_t)\end{aligned}\right\}\tag{2-170}$$

所以复合材料的平均应力为

$$\left.\begin{aligned}\sigma_c&=\frac{1}{2}(\sigma_f)_{\max}V_f+\sigma_mV_m\qquad(l<l_t)\\ \sigma_c&=(\sigma_f)_{\max}\left(1-\frac{l_t}{2l}\right)V_F+\sigma_mV_m(l>l_t)\end{aligned}\right\}\tag{2-171}$$

如果纤维长度远大于荷载传递长度（例如：$l=100l_t$），则因为 $1-\frac{l_t}{l}\approx1$，而式（2-171）的第二式可以写成

$$\sigma_c=(\sigma_f)_{\max}V_f+\sigma_mV_m\qquad(l\gg l_t)\tag{2-172}$$

这就是连续性纤维复合材料的平均应力。

根据纤维长度，单向短纤维复合材料可以用式（2-171）和式（2-172）来讨论强度预报。如果纤维长度小于临界长度，那么纤维的最大应力达不到纤维的平均强度。因此，无论作用力有多大，纤维都不会断裂。在这种情况下，复合材料的破坏是由于基体或界面破坏所引起，而复合材料的强度 σ_{cu} 近似地可以写成

$$\sigma_{cu}=\frac{\tau_yl}{d}V_f+\sigma_{mu}V_m\qquad(l<l_{cr})\tag{2-173}$$

如果纤维长度大于临界长度，纤维的应力可以达到它们的平均强度。在这种情况下，如果所受的最大应力达到其强度时，复合材料将开始破坏，因此单向短纤维复合材料的强度可

以表示为

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu}\left(1 - \frac{l_{cr}}{2l}\right)V_f + (\sigma_m)_{\varepsilon f}V_m \qquad (l < l_{cr}) \tag{2-174}$$

和

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu}V_f + (\sigma_m)_{\varepsilon f}V_m \qquad (l \gg l_{cr}) \tag{2-175}$$

式中：$(\sigma_m)_{\varepsilon f}$是与纤维断裂时应变 ε_f 所对应的基体应力。在上式中，$(\sigma_m)_{\varepsilon f}$可以近似地用 σ_{mu}（基体强度）来代替。按式（2-174）和式（2-175）来计算单向短纤维复合材料，实际上已假设纤维体积比高于某一个最小值 $V_{\min}$。这时，如果所有纤维破坏的话，剩下基体没有能力单独承担外力作用。所谓临界纤维体积比，是使纤维能够实现增强作用的最小纤维体积比。最小纤维体积比和临界纤维体积比可定义成：[11]

$$V_{\min} = \frac{\sigma_{mu} - (\sigma_m)_{\varepsilon f}}{\sigma_f + \sigma_{mu} - (\sigma_m)_{\varepsilon f}} \quad V_{crit} = \frac{\sigma_{mu} - (\sigma_m)_{\varepsilon f}}{\sigma_f - (\sigma_m)_{\varepsilon f}} \tag{2-176}$$

一般来说，对于同样的纤维和基体材料，短纤维的 $V_{\min}$和 V_{crit}比连续性纤维要高。因为短纤维的增强作用不象连续性纤维那样有效。然而，当纤维长度远大于荷载传递长度时，纤维的平均应力趋近于最大纤维应力。于是短纤维复合材料的性能也就与连续纤维的性能差不多了。

如果纤维体积比小于 $V_{\min}$，当所有纤维断裂时，复合材料不会断裂，因为基体材料的剩余截面面积还可以支持全部荷载。只有基体破坏时，复合材料才破坏。所以当 $V_f < V_{\min}$，复合材料的强度可以写成：

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu}(1 - V_f) \qquad (V_f < V_{\min}) \tag{2-177}$$

在短纤维复合材料中，还有一个因素会影响其破坏，那就是纤维末端引起的基体中的很高的应力集中，这个应力集中进一步降低了复合材料的强度。

（二）乱向短纤维复合材料的弹性模量和强度预报

对于工程中最常用的乱向短纤维复合材料，例如，钢纤维混凝土材料，其短纤维多不是沿荷载方向单向配置的，面是呈乱向随机地分布。只有当纤维完全与荷载同方向时，其对基体的增强效果最好。当纤维垂直于荷载方向时，就完全失去了增强作用。对于与荷载方向成 θ 角的纤维，其能够分担外荷载的有效长度为其沿荷载方向的投影长度 $l\cos\theta$。通常把纤维的有效长度记为 $\eta_0 l$，称 η_0 为纤维的方向系数。当复合材料中每根纤维都处于不同方向时，η_0 为所有纤维取向角上的纤维方向余弦的平均值，并有 $0 \leqslant \eta_0 \leqslant 1$。

在应用混合律时，能起到增强作用的纤维有效体积率为 $\eta_0 V_f$，而基体的体积率并没有发生变化。于是，乱向纤维复合材料的应力和弹性模量可表达为

$$\left.\begin{aligned} \sigma_c &= \eta_0\eta_l\sigma_f V_f + \sigma_m V_m \\ E_c &= \eta_0\eta_l E_f V_f + E_m V_m \end{aligned}\right\} \tag{2-178}$$

式中：系数 η_0 及 η_l 可由细观力学方法或实验确定[12]。

总之，由于短纤维复合材料较连续性纤维增强复合材料更加复杂。因此，无论是哪一种短纤维复合材料的强度预报，都还有不少工作需要进一步深入研究。

第三章　钢纤维混凝土

第一节　概　　述

钢纤维混凝土（简称 SFRC）是将钢纤维均匀地掺入普通混凝土中的一种新型复合材料，具有良好的物理力学性能。目前，世界各国在研究开发的基础上，已将钢纤维混凝土广泛应用于各类工程中。本章着重对钢纤维混凝土的材性、增强机理、组成设计等问题进行分析，并对钢纤维混凝土的应用也做了相应介绍。

一、钢纤维混凝土的一般特性

（一）钢纤维混凝土的特点

与普通混凝土相比：钢纤维混凝土有以下显著特点：

1. 抗裂性较好

在钢纤维混凝土中，短钢纤维是乱向分布于混凝土基体中的，它的主要作用之一是阻碍混凝土内部裂缝的扩展并阻滞宏观裂缝的发生和发展。大量实验表明：当钢纤维混凝土受到弯拉荷载时，由于混凝土基体微裂纹的扩展起到约束作用，从而大大提高了混凝土抵抗开裂的性能。当荷载不断加大，达到最大应力值时，钢纤维混凝土不象普通混凝土那样发生脆断，而仍具有一定的承载与变形能力。

2. 韧性显著增加

材料吸收能量的性能称为韧性。在钢纤维混凝土的荷载与变形关系中，通过实验可以看到，初期裂纹荷载（即最初产生裂纹之点与其对应的荷载值）比普通混凝土的荷载值显著增大。如果继续增加荷载，当钢纤维与混凝土界面的粘结力还没有被破坏时，荷载将由钢纤维继续传递，使整个钢纤维混凝土仍具有承载能力。再增加荷载，达到极限荷载，通常此时也是纤维与混凝土界面粘结强度达到了极限，则纤维便会被逐渐拔出，而拔出众多的纤维需吸收大量能量，即钢纤维混凝土的韧性。材料表现为良好的延塑性。钢纤维混凝土的韧性比普通混凝土有显著增加。

3. 强度提高

由于大量的细的钢纤维均匀而乱向地分散在混凝土基体中，使得钢纤维与混凝土的接触面积较大，因而在所有方向上都将使混凝土的强度得到增强。如钢纤维掺量适当时，其抗拉、抗弯强度都比普通混凝土有很大改善，抗压强度也有提高。表 3-1 为钢纤维掺入率为 2%、钢纤维直径为 0.3～0.6mm、长度为 20～40mm 时，钢纤维混凝土与普通混凝土性能的比较。

（二）钢纤维混凝土的一般性能

1. 物理性能

钢纤维混凝土的物理性能包括干缩、徐变、热传导性及耐磨性。

钢纤维混凝土与普通混凝土性能比较[123]　　表 3-1

序　号	钢纤维混凝土	与普通混凝土比较	序　号	钢纤维混凝土	与普通混凝土比较
1	抗压强底	1.0～1.3 倍	1	早期抗裂强度	1.5～2.0 倍
2	抗拉强度和抗弯强度	1.5～1.8 倍	5	耐冲击性能	5.0～10.0 倍
3	抗剪强度	1.5～2.0 倍	6	韧性	40～200 倍

1）干缩：混凝土基体中，受钢纤维抑制，钢纤维混凝土的干缩率有所减小。纤维率越高，其干缩率的减小程度越大。其整体收缩率还与水灰比有关，当水灰比减少时，整体收缩率也随之减小。实验表明：当钢纤维掺量为 1.5%时，钢纤维的长径比（L_f/d_f）为 50 时，钢纤维混凝土的收缩值可降低 7%～9%。

2）徐变：持续荷载下，钢纤维混凝土的受压徐变与同条件的普通混凝土相近，略有降低，如果改变钢纤维形状（如改用波形钢纤维，有实验证明，当纤维尺寸为直径 0.55mm，长 30mm，纤维率 1%时），则徐变较混凝土大为减小。有时为了获得较好流动性而增大钢纤维混凝土的水灰比时，则其徐变会略有增大。

3）热传导性与耐热性：掺入钢纤维混凝土可以提高混凝土的导热系数，提高程度与纤维率成正比，随着纤维掺入量的增大，导热系数增大。采用烘干试件进行测定表明，当掺入 2%的钢纤维后，导热系数比素混凝土提高 30%。关于耐热性，日本曾对用钢纤维加强耐热混凝土的耐热性能进行过研究。研究表明：埋裹纤维（即把钢纤维浇注成型，埋藏在 5mm 厚的浇注砂浆中进行试验）加热到 1250℃以下时，仍有增强作用，但达到 1300℃，情况则发生变化，此时不锈钢纤维氧化，截面缩小，钢纤维混凝土的强度将降低 60%，纤维不再有增强效果，因此，如果钢纤维混凝土在 1000℃～1200℃条件下工作，其抗弯强度随纤维含率增大而提高，达 1400℃则反而随纤维含量而降低。

4）耐磨性：对钢纤维掺入混凝土中对混凝土的耐磨性有无改善的问题，目前不同文献有相反报道。有文献报道，钢纤维混凝土的耐磨性比普通混凝土要改善很多，在金钢砂的磨损下，钢纤维混凝土重量损失要少 50%；而国内另有研究资料又表明：钢纤维混凝土的耐磨性比普通混凝土无明显改善，甚至有轻微降低。对于钢纤维混凝土的耐磨性问题，目前尚无权威定论，因而也是今后在研究应用中应该注意的问题。

2. 力学性能：钢纤维混凝土的力学性能包括强度、弹性模量、耐疲劳性、韧性等。

1）强度：混凝土之所以损坏，主要是由于混凝土基体原来就具有微裂纹，在外力作用下，微裂缝扩展、贯通而导致破坏。但在钢纤维混凝土中，由于钢纤维的作用，对混凝土微裂缝扩展起约束作用，并可通过界面粘结力跨过裂纹传递内力，使整体继续发挥承载能力。

钢纤维混凝土的破坏特征是纤维从混凝土中拔出，如若增强纤维与基体界面的粘结强度，则可使整体强度提高。在钢纤维混凝土中，掺入的钢纤维大都是短而细、纤维直径很小，在基体中密度大，因此纤维间距较小，使纤维界面面积增大，接面应力减小，因而纤维不易被拔出，从而使整体强度得以提高。

当纤维完全与荷载同方向时，其对基体的增强效果最好。当纤维与荷载方向垂直时，就完全失去增强作用。当纤维与荷载方向成 θ 角时，通过理论计算，其能够分担外荷载的有效长度为纤维沿荷载方向的投影长度 $L\cos\theta$。通常把纤维的有效长度记为 $\eta_\theta L$。其中 η_θ 为纤维的方向系数，当纤维充分均匀分布且均匀取向时，η_θ 为所有纤维取向角上的纤维方向余弦的平均值，通常可取 $\eta_\theta=0.405$。

2）弹性模量：由于钢纤维混凝土中纤维率不大，纤维对整体模量的影响很小，钢纤维混

凝土的受压弹性模量和泊松比可近似取与混凝土相同。受拉弹性模量随纤维掺量增加有0～20%的小幅度提高，在设计中可以忽略这种差别，也可根据乱向纤维复合材料的弹性模量公式求得。

3）抗疲劳性：钢纤维混凝土可明显改善混凝土的耐疲劳性。将钢纤维混凝土进行疲劳实验得出，经10^5次反复施荷、卸荷，钢纤维混凝土受弯时的残余强度仍可达到其静力抗弯强度的2/3左右。有研究表明：当应力比为0.7时，纤维混凝土抗弯疲劳寿命超过10^5次，而普通混凝土仅达850次。

4）韧性：钢纤维混凝土在受拉或受弯过程中虽已多次出现裂缝，仍具有相当高的变形能力。此种变形能力可用韧性表示。通常用荷载位移曲线下（或应力应变曲线下）所覆盖的面积来表示，表示方法不同，数值上会有差别。在通常的纤维掺量下，抗压韧性可提高2～7倍，抗弯韧性可提高几十到上百倍；弯曲冲击韧性可提高2～4倍。韧性是衡量塑性变形性能的重要指标。

3. 耐久性：钢纤维混凝土的耐久性包括物理耐久性与化学耐久性两个方面。

1）物理耐久性：钢纤维混凝土在各种物理因素作用下，耐久性都有不同程度的提高。其耐冻融性、耐热性和抗气蚀性有明显提高，有实验表明：掺有1.5%钢纤维（$L_f/d_f=50$）的混凝土（$W/C=0.55$）经150次冻融循环时，抗压和抗折强度下降约20%，而相同条件的普通混凝土下降达60%以上。如经200次冻融循环时，钢纤维混凝土保持完好，普通混凝土则完全崩溃。

2）化学耐久性：钢纤维混凝土在空气、污水和海水中抵抗腐蚀的性能，称为钢纤维混凝土的化学耐久性。钢纤维混凝土也表现出良好的化学耐久性。如果钢纤维混凝土的水灰比比较低，渗透性较小，质量好，又不带裂缝的话，则在大气和海洋环境中，碳化和氯离子的扩散速度都较低，经10年其碳化深度一般不超过5mm。同时内部钢纤维不产生锈蚀，其抗拉、抗折强度几乎不降低。如进行浸海水循环试验（浸12h，空气中干12h），钢纤维混凝土氯离子浸入深度较普通混凝土小，尽管氯离子超过0.4%的活化量，也未见钢纤维腐蚀，且其机械强度还有提高。

对于已经开裂的（由于荷载或其它因素）钢纤维混凝土，腐蚀速度与环境、裂缝状况、水灰比、渗透性、钢纤维的类型、尺寸等有关。初步研究结果说明，如裂缝宽度小于0.15mm时，在海水环境中对钢纤维影响很小，对构件性能无明显影响。如裂缝较大，则随时间而逐渐腐蚀，其强度随裂缝宽度而加剧。

二、钢纤维混凝土的增强机理

（一）混凝土的基本特性和破坏机理

1. 混凝土的基本特性

任何材料的性能与组织结构之间，都存在着密切的依存关系，研究材料的性能，只有与其内部组织结构联系起来，才能认识性能的内在原因和变化规律，进而达到改善性能的目的，从混凝土的组织结构分析，混凝土的基本特性可归纳为以下几个方面：

1）宏观堆聚结构的分层现象

从宏观上，可认为混凝土是一种堆聚状组织结构，在浇灌成型过程中及凝结硬化以前，流动性混凝土混合料由于固体粒子的沉降作用，一般会发生不同程度的分层现象。分层的结果，使粗大颗粒沉积于下部，多余水分被挤上升或积聚于粗集料或砂浆下方。这种外分层，使混

凝土沿浇灌方向的宏观堆聚结构不均匀，下部强度大于顶部强度，表层混凝土成为最疏松和最软弱的部分。与此同时，在混凝土中，粗集料下方还会发生内分层，将混凝土分为充水区、正常区、密实区三个区域。在充水区内由于含水量大，蒸发后形成孔穴，成为混凝土中最弱的部分。内分层的结果，使混凝土具有各向异性，表现为沿浇灌方向的抗拉强度比垂直该方向的低。

2）水泥石在混凝土中起主要作用

在普通混凝土中，起胶结作用的是由水泥凝结硬化而成的水泥石，水泥石占混凝土总体的1/4，对混凝土的影响起着主要作用，水泥石的结构主要由水泥凝胶、毛细管孔腔和残余的未水化的水泥颗粒三者组成。根据水灰比的大小和水化程度的不同，也可以完全由水泥凝胶组成，或者由水泥凝胶与其余两者之一组成。水泥凝胶是水泥中起胶结作用的物质，由各种水化物组成（主要是水化硅酸钙凝胶及少量的水化铁酸钙凝胶和一些非胶体组分），具有空间网格结构。毛细管孔腔具有不同的形状，大小约为1.3μm，杂乱分布于水泥凝胶中。随着水泥水化反应的进行，水泥石中水泥凝胶的体积增加，毛细管孔腔的体积减小，水泥石强度将随着增长。研究表明：水泥石的胶空比（水泥凝胶体积/水泥凝胶＋毛细管孔腔体积）与混凝土强度的关系为：强度（抗压）近似于与胶空比的三次方成正比。

3）混凝土是一种多层次体系的三相复合材料

混凝土材料组织结构可分为混凝土、砂浆、硬化水泥浆三个层次。同时，混凝土也是一种三相复合材料，即基相、分散相及结合面。随组织结构层次的不同，基相与分散相也不同。如第一层混凝土，其基相为砂浆，分散相为骨料，骨料与砂浆的结合处即为结合面。第二层砂浆中，基相则为水泥浆，分散相为砂，结合面为砂与水泥浆的结合处。第三层水泥浆中，水泥浆凝胶是基相，一些缺陷做为分散相，基相与分散相的结合处是结合面。每个层次中的结合面都是薄弱面，在结合面处都会产生结合缝，只是随层次体系不同，结合缝尺寸大小不同。各层结构及特点见表3-2。

混凝土各层次结构及特点[12]　　表3-2

层次体系	基　相	分　散　相	结　合　面	特　　点
混凝土	砂浆	骨料	骨料与砂浆的结合处	受力时，首先起裂
砂浆	水泥浆	砂	砂与水泥浆的结合处	比第一层结合缝尺寸小一个量级，其次开裂
水泥浆	水泥浆凝胶	缺陷（未水化的水泥颗粒、空隙等）	凝胶与缺陷的结合处	结合缝尺寸较小，比第二层小几个数量级，最后进入

在每一层中，都有结合面，而结合面处常产生结合缝，混凝土破坏通常从薄弱处产生。由于砂和水泥浆的结合缝尺寸比砂浆与骨料结合面处产生的结合缝要小，至少小一个量级，而未水化的水泥颗粒的尺寸及空隙的尺寸又比砂和水泥浆的结合面处产生的结合缝尺寸小，至少小几个数量级。因此，在同样应力状态下，骨料和砂浆的结合面首先起裂，其次是砂浆和水泥浆的结合面开裂，最后裂缝进入硬化水泥浆，导致了混凝土材料的破坏必然是一个较长的结构变化过程。

4）具有毛细管——孔隙结构特点

从上述分析可知，混凝土中存在着结合面，在结合面处产生结合缝，同时还可能存在着由于水泥石的干燥收缩和温度变形而引起的微裂缝。也就是说，在混凝土中，承受荷载之前，就已经存在着先天的微裂缝和缺陷。普通混凝土的孔隙率一般不少于8%～10%，混凝土的毛细管—孔隙特点与混凝土的物理性质有着密切关系。

2. 混凝土的破坏机理

混凝土受外力作用后，其内部产生拉应力，并在原有微裂缝的顶部引起应力集中，当荷载逐渐增加到一定水平时，可听到混凝土内部破坏的微弱而清晰的噪声，使混凝土微裂缝扩展，直到在混凝土表面能看到许多小裂缝，随着荷载继续增加，拉应力的逐渐增大，这些裂缝会进一步延伸、合并，最后形成贯通裂缝，混凝土就随着这些裂缝的形成而破坏。因此，可以说混凝土受力破坏的过程是由于内部裂缝发生、扩展及连续的过程，也是混凝土内部结构由连续向不连续的演变过程。

（二）钢纤维的增强机理

1. 钢纤维增强机理的基本观点

把钢纤维掺入混凝土中，起到了不同程度的增强作用。目前，对于钢纤维增强机理的分析，主要有以下几个基本观点[12]：

1）结构层次观点

此观点将钢纤维混凝土分为宏观结构层次、细观结构层次和微观结构层次。宏观层次观点是认为：钢纤维混凝土是连续的匀质材料，是由尺寸大于几厘米的宏观尺寸的结构单元组成。通过这些具有相同性质的单元来研究材料在复杂应力作用下的破坏，材料整体的行为可通过对这些单元性质进行简单的积分而定。细观层次观点认为：钢纤维混凝土是连续的但不匀质的材料。它的结构单元尺寸在 10^{-4}cm 至几个厘米之间变化。这些结构单元的性质各不相同，这些结构单元是可见的或者可以使之成为光学可见的。在理论上，是通过力学模型及对所有组成整体的各单元的性质作统计的总和来进行研究，或通过力学试验作直接观测。微观层次观点认为：材料是既不连续，又不匀质的。它是由原子和分子尺寸的不连续质点而组成的。材料的结构单元是原子或分子。原子和分子间相互作用产生了决定的力学作用。是根据统计力学的方法对假定的原子结构作适当的简化的原子模型来进行的。表 3-3 是钢纤维混凝土各结构层次及特点。由于宏观层次上分析钢纤维混凝土无法揭示其结构组成与性能的关系，而微观层次上，主要是从水泥水化产物、钢纤维混凝土界面组成等方面进行分析，困难也较大，因此，对钢纤维增强机理的研究重点放在细观层次上。

钢纤维混凝土的结构层次及特点[12]　　表 3-3

结构层次	单元尺寸	结构特点
宏观层次	$>n$ cm	匀质、连续材料。不考虑钢纤维、粗细集料、水泥水化产物、未水化水泥颗粒、孔、缝的差异
细观层次	$10^{-4}\sim10^{1}$ cm	不匀质，但至少有一相连续的多相复合材料，包括钢纤维、粗细集料、水泥水化产物、未水化水泥颗粒、孔、缝等相
微观层次	$<10^{-4}$cm	既不均质，也不连续的材料，由晶体结构、分子结构等各不相同的组分组成

2）复合材料观点

复合材料观点是在细观层次上分析问题的结果，该观点认为，钢纤维混凝土是一种多相复合材料，组成钢纤维混凝土的每一种材料为一个相，复合材料的行为就取决于各相的行为以及各相的体积率和相的几何特征（相的界面总体称为相的几何学特征）。为简化分析，通常可将多相复合材料做为多级二相复合材料来处理。钢纤维混凝土的多级二相关系可参见图 3-1，图中第一相为基相，第二相为分散相。从图中可看到，作为一级二相复合材料，钢纤维混凝土是由混凝土为第一相（基相）、钢纤维为第二相（分散相）所组成的复合材料。作为二级二相复合材料，钢纤维混凝土可看成是由水泥砂浆为第一相，粗骨料为第二相所组成的复合

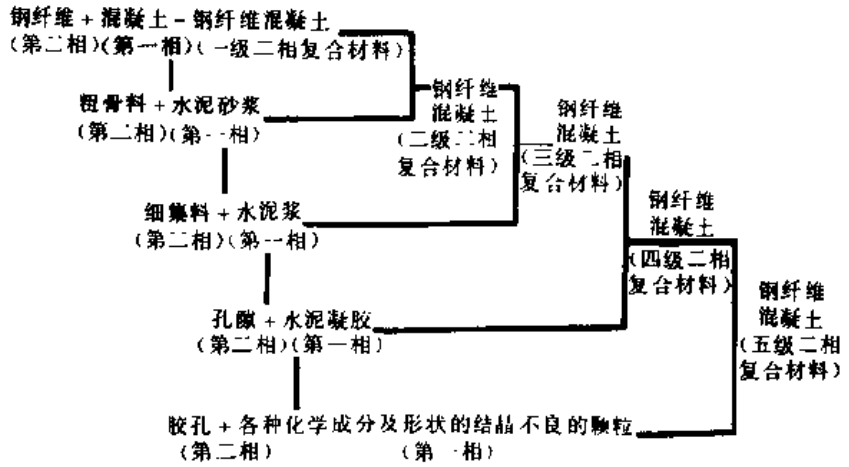


图 3.1 钢纤维混凝土的多级二相关系

材料为第一相，钢纤维为第二相的复合材料。如果作为三级二相复合材料，则将钢纤维为第二相，将水泥浆为第一相、细集料为第二相组成的复合材料为第一相，粗骨料为第二相的复合材料再作为第一相所组成的复合材料，以此类推。

应用复合材料观点便于采用各种复合材料模型来分析研究材料组分、结构与其性能之间的关系；还可以直接使用复合材料力学的混合规律或其修正式来预测材料的结构不敏感特性。

3）界面观点

界面观点是在细观结构层次上、将材料视为复合材料的结果。该观点认为：复合材料中各相是通过界面结合而成为整体的。界面结合的强弱通常取决于组成界面的二相的实际接触面积，以及界面自由能的大小。在钢纤维混凝土中，钢纤维、集料与硬化水泥浆体之间存在的界面区是混凝土内部结构中的薄弱环节，对钢纤维混凝土的破坏有显著影响。

4）能量观点

能量观点认为：能量是一个能够贯穿不同结构层次的通用物理量，能够从材料的微观、细观结构层次上分析材料的组分、结构与宏观性能的关系。材料内部结构的形成、发展及破坏过程就是能量的转化过程。材料受力后，蓄积的变形能，会及时转化为热能面散失。否则，将会通过产生裂缝及破坏而转化为表面能等。

5）断裂力学观点

目前，关于钢纤维混凝土的断裂过程与破坏现象，主要是引用线弹性断裂力学的基本观点。即造成脆性材料裂缝快速扩展并最终引起断裂的原因，是临界应变能释放率或临界应力强度因子，并提出了钢纤维混凝土的断裂模型如图 3-2，来描述钢纤维阻裂增强情况，该模型有三个区域组成。I 区代表钢纤维混凝土中的真实裂纹。在这个区域，所有纤维均已被拔出，开裂表面抗力为零。II 区为假塑性区（即钢纤维能起到阻裂增强的区域），该区的混凝土基体正在开裂，钢纤维发挥阻裂作用阻止裂纹张开，裂纹长度在此区域缓慢增长，直到临界状态。III 区为微裂区（或称过渡带），随荷载的增加，该区将向 II 区转化。

2. 增强机理的基本理论

基于以上对钢纤维混凝土增强机理的分析，关于增强机理的研究，现在主要有两大理论：

1）纤维间隔理论（纤维阻裂理论）

纤维间隔理论是根据线弹性断裂力学，从混凝土破坏过程的裂缝发生、发展的机理来说明纤维的约束作用。该理论强调纤维的阻裂作用和纤维的线弹性断裂力学，它与纤维的间距

有关。在没有纤维的情况下，混凝土在外力作用时易出现裂缝并扩展贯穿整个材料，这是因为脆性材料对抵抗断裂的能力是极其脆弱的；当在混凝土基体材料中加入一定数量的纤维时，由于纤维的断裂应变大大高于水泥的开裂应变，纤维能完好地跨接在缝口上，抑制裂缝的扩展。为了说明纤维约束脆性材料裂缝的原理，Romualdi 提出了纤维间隔理论的力学模型，如图 3-3 所示。

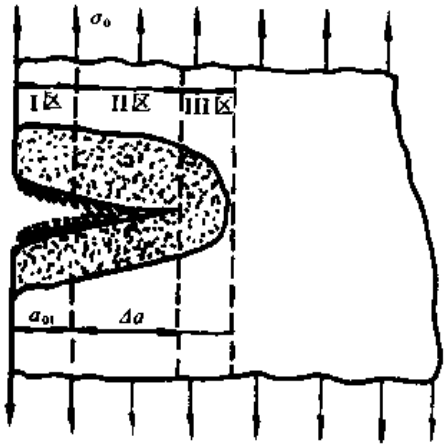


图 3-2　钢纤维混凝土断裂模型

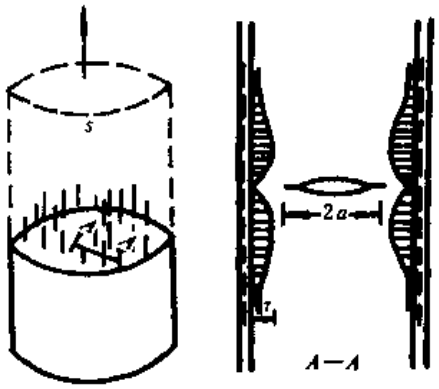


图 3-3　纤维间隔理论的力学模型

图中，假定拉应力方向上，纤维网格状态类似棋盘布局，纤维间距为 s，裂纹半径为 a，并存在于四根纤维所围成的区域中心。在这种情况下，由于拉应力的作用，粘结应力的分布将产生于临近裂缝的纤维周围，纤维起着约束裂缝开裂的作用。使抗裂强度得以提高。为了扩大这种效果，减小纤维之间的间距是有效的措施，于是得出结论：钢纤维增强混凝土的抗裂强度受纤维间距的影响，但如果纤维的弹性模量小于被增强的材料时，这种理论便不能运用。

从理论上进行分析：可得出单位面积内纤维根数 η 越多，纤维间距 s 越小，初裂强度提高的效果也就越好。

另外，Romuldi 和 Mandel 还对掺入短钢纤维混凝土进行了试验，证实了钢纤维增强混凝土的初裂强度是受纤维间距支配的，并通过实验得出抗裂强度同纤维间距之间的关系为：在一定的纤维体积率时，可近似的认为抗裂强度同纤维间距成 1/3 的比例关系。当纤维间距为 s 时，在某一断面能够有效地抵抗拉伸应力的纤维平均间距为：

$$s = 13.8 d_f \sqrt{1/p} \tag{3-1}$$

式中：s——纤维平均间距；

d_f——纤维直径；

p——纤维体积百分率（$p=100V_f$；V_f 为纤维体积率，即 $1m^3$ 钢纤维混凝土中钢纤维所占体积百分率）。

2）复合材料混合律理论（复合理论）

该理论认为复合材料的初裂强度主要与纤维的体积率、取向和长径比有关，至于纤维混凝土的极限强度，则主要取决于纤维的体积率、长径比和纤维的粘结强度，纤维与混凝土的粘结强度是影响纤维增强作用的主要因素。当纤维承受压力时，荷载由混凝土通过纤维—混凝土的界面传递给纤维。如果界面无粘结，纤维是不能发生增强作用的，如果界面粘结得不够强，则在不大的应力作用下，将发生界面粘结破坏，这样也不能发挥纤维的增强作用。当纤维的最大拉应力等于抗拉强度时，则纤维的长径比称为临界长径比。当采用的纤维长径比

大于临界值时，纤维混凝土在拉力作用下，将发生纤维拉断破坏，这时则充分发挥了纤维的增强作用。当长径比小于临界值时，则发生纤维拔出性破坏。因此得出：临界长径比随着纤维——混凝土界面粘结强度的增大而减小。钢纤维混凝土在长径比小于150的情况下，大多发生纤维拔出性受拉破坏。

纤维间距理论和复合材料混合律理论是从两个不同侧面解释钢纤维对混凝土的增强作用。

第二节　钢纤维混凝土的性能

一、钢纤维混凝土的力学性能

钢纤维混凝土与普通混凝土的力学性能不同，由于在混凝土中掺入的钢纤维是随机乱向分布的，受钢纤维的分布与取向的影响，它的受力特性与尺寸效应比普通混凝土更为复杂，钢纤维混凝土的强度有抗压强度、抗拉强度、抗剪强度、抗折强度。

（一）钢纤维混凝土的强度[24]

1. 抗压强度

（1）立方体抗压强度

虽然钢纤维混凝土的立方体抗压强度受钢纤维的掺量和钢纤维特性的影响较小，并且与抗拉、抗折强度的相关性也较差，但钢纤维混凝土立方体抗压强度仍是评价耐久性和基体混凝土性能的一个重要指标。根据立方体抗压强度标准值可以确定钢纤维混凝土的强度等级。

钢纤维混凝土的立方体抗压强度试验，在标准试件尺寸、试件尺寸误差限制、加荷速度和试验结果处理等问题上的取值原则均与普通混凝土试验方法标准相同。只是由于钢纤维混凝土骨料粒径不大于20mm，钢纤维长度一般不大于50mm，因此一般可不采用普通混凝土200mm×200mm×200mm的非标准试件。当纤维长度不大于40mm时，可采用100mm×100mm×100mm的非标准试件。当采用非标准试件尺寸时，由于尺寸效应与钢纤维的边壁效应，使纤维的约束作用随尺寸减小而提高，因此，所得结果应乘以系数，换算成标准试件强度，所乘系数按表3-4规定进行。

不同尺寸试件强度换算系数　　表3-4

试件形状	试件尺寸（mm）	换算系数	试件形状	试件尺寸（mm）	换算系数
立方体	150×150×150	1.0	棱柱体	150×150×300	1.0
立方体	100×100×100	0.9	棱柱体	100×100×300	0.9

（2）棱柱体抗压强度

在钢筋混凝土结构设计规范中，通常以棱柱体抗压强度指标作为轴心抗压强度的依据。为与普通混凝土强度相比较，同时反映钢纤维混凝土的特点，钢纤维混凝土的轴心抗压强度试验的标准试件尺寸采用150mm×150mm×300mm的棱柱体，由于骨料粒径不大于20mm，钢纤维长度一般都小于50mm，所以，也可用100mm×100mm×300mm的非标准试件。由于同样的原因，当采用非标准试件时应按表3-4的规定乘以相应的系数进行换算，其试验方法与普通混凝土的轴心抗压强度试验方法相同。

标准棱柱体强度f_{fc}与标准立方体强度f_{fcu}之间的关系，通过对大量试验数据进行统计得出的结果为$f_{fc}/f_{fcu}=0.81$，设计时，可取标准立方体强度的0.7倍作为棱柱体抗压强度。

2. 抗拉强度

抗拉强度是混凝土的基本力学性能之一，是确定抗裂度的重要指标。由于直接受拉测定较为困难，难以保证试件的几何对中及物理对中，以及可能出现偏拉破坏，影响试验结果，因而大多采用劈裂抗拉，间接测定混凝土的抗拉强度。对于钢纤维混凝土来讲，因为初裂强度和极限强度之间的差异随着纤维体积率和纤维长径比的增大而增大，因此，对于能否用劈裂抗拉实验测定钢纤维混凝土的抗拉强度，国内外还没有定论，但通过对试验方法的应力分析，国内学者推荐用劈裂抗拉强度作为钢纤维混凝土的抗拉强度。

钢纤维混凝土的劈裂抗拉强度试验[24]，采用边长为 150mm 的立方体为标准试件，当纤维长度不大于 40mm 时，可采用边长为 100mm 的立方体试件。采用非标准尺寸试件时，应乘以 0.8 的系数，换算为标准尺寸的强度值，钢纤维混凝土的立方体试件劈裂抗拉强度按下式计算：

$$f = \frac{2F_{max}}{\pi A} = 0.637\frac{F_{max}}{A} \tag{3-2}$$

式中：f——钢纤维混凝土的劈裂抗拉强度（MPa）；

F_{max}——最大荷载（N）；

A——试件劈裂面积（mm^2）。

3. 抗剪强度

钢纤维混凝土的抗剪强度是隧道设计施工的主要指标之一，也是桥面铺设、补强、修补的衡量指标。

由于双面直接剪切法简单易行，受力状态接近纯剪，我国及日本的钢纤维混凝土的抗剪强度都采用这一方法。试件采用截面为 100mm×100mm 的梁式试件，其长度为截面高度的 2～4 倍。试件的抗剪强度按下式计算：

$$f_{fv} = F_{max}/2bh \tag{3-3}$$

式中：f_{fv}——钢纤维混凝土抗剪强度（MPa）；

F_{max}——最大荷载（N）；

b——试件平均宽度（mm）；

h——试件平均高度（mm）。

4. 抗折强度

钢纤维混凝土在路面、桥面、机场跑道等工程中，主要是承受弯曲应力。掺入钢纤维使混凝土的抗折强度有较显著的提高，钢纤维混凝土的抗折强度为设计提供了数据，并作为检验施工期混凝土质量的指标。因此，抗折强度是评价钢纤维混凝土性能的重要指标之一。

钢纤维混凝土抗折强度试验采用 150mm×150mm×600mm（或 550mm）的小梁为标准试件。当纤维长度不大于 40mm 时，可采用 100mm×100mm×400mm 的试件，由于靠近试模边缘，钢纤维受到一定的约束，产生定向作用的影响，当采用 100mm×100mm×400mm 试件时，所测得抗折强度应乘以 0.85 的系数，试件抗折强度按下式计算：

$$f_{fc,m} = \frac{F_{max}L}{bh^2} \tag{3-4}$$

式中：$f_{fc,m}$——钢纤维混凝土抗折强度（MPa）；

F_{max}——最大荷载（N）；

L——支座间距（mm）；

b——试件截面宽度（mm）；

h——试件截面高度（mm）。

（二）影响强度的因素

根据纤维增强机理的各种理论，钢纤维混凝土的强度与纤维体积率、纤维长径比、基体参数、纤维在基体中的分布取向、以及纤维与基体间的粘结强度等诸因素有关。

1. 纤维体积率

一立方米钢纤维混凝土中钢纤维所占体积百分数称为纤维体积率，以 V_f 表示。

钢纤维对混凝土起到增强作用，大量实验表明，钢纤维混凝土的初裂荷载、极限荷载、韧性、抗折强度随纤维积率的增加而增大、立方体抗压、轴心抗压也稍有增加。因此，钢纤维体积率不应小于0.5%，但纤维体积率也不能过大，纤维掺量过多，纤维比表面积增加，包裹在每根纤维周围的水泥胶体减少，钢纤维就会因纤维与基体间粘结不足而过早破坏，同时，由于纤维比表面积的增加，影响了起充填作用的浆体，使混凝土的密实度下降，影响其强度。另外，纤维过多还将造成拌合、搅拌困难、使纤维不可能均匀分布，使钢纤维混凝土强度下降。钢纤维混凝土的纤维体积率应通过实验来确定。

2. 纤维长径比

钢纤维长度 L_f 对直径 d_f 和等效直径的比值称为纤维长径比，通常用 L_f/d_f 表示。钢纤维混凝土的力学性能应随长径比的增大而提高，但过长过细的钢纤维，在与混凝土拌和过程中易结团，使纤维难以均匀分布，影响钢纤维混凝土的工作度，同时，在拌和中，长径比过大，钢纤维易弯折使钢纤维混凝土的抗折强度下降。只有在适当的纤维体积率和纤维长径比时，钢纤维混凝土的力学性能才会随纤维体积率和长径比的增大而明显改善。因此，作为综合性影响因素的纤维含量特征参数 λ_f 反映了纤维体积率和长径比对钢纤维力学性能的影响。纤维含量特征参数可按下式求得：

$$\lambda_f = V_f L_f / d_f \tag{3-5}$$

式中：λ_f——纤维含量特征参数；

V_f——纤维体积率；

L_f——钢纤维长度；

d_f——钢纤维直径。

3. 基体参数

混凝土基体的水灰比、水泥用量、砂率及骨料粒径对钢纤维混凝土强度的影响也很大。

钢纤维混凝土的抗压强度随基体水灰比的减小而增大，当水灰比一定时，抗压强度随水泥用量的增加而增大，但水泥用量也不能过多，因为在保持水灰比不变的条件下，水泥用量增加，将使相应的单位用水量也增加，混凝土中空隙增多，同时骨料用量相对减小，对强度不利。减小基体水灰比，对提高钢纤维混凝土的抗折强度也十分有利。试验研究表明，基体水灰比从0.4减小到0.3时，纤维与混凝土基体之间的粘结强度从2.45MPa增大到3.71MPa，增加了53%。

混凝土骨料的大小，对钢纤维在混凝土中的分布影响很大，纤维在基体中分布的均匀性随骨料最大粒径与纤维长度的比值的增大而下降。当最大骨料粒径为纤维长度一半时，纤维对混凝土的增强效果最好。由于实用中钢纤维长度一般不超过40mm，所以骨料最大粒径以不超过20mm为宜。

钢纤维混凝土的砂率应与基体的水灰比、钢纤维体积率相适应，过大过小都对强度不利，一般在0.4～0.6范围为宜。

4. 纤维在基体中的分布和取向

钢纤维如果不能在混凝土基体中均匀分散，则钢纤维混凝土的力学性能就不能提高。搅拌钢纤维混凝土的目的在于使纤维能均匀分散、不离析、不结团。在搅拌过程中，搅拌机种类、搅拌时间、投料顺序等都对纤维的分散起影响作用；进行振动捣固时，振动频率越大，振动时间越长、钢纤维下沉的倾向也越强，分散度因而减小。另外，钢纤维长径比越大，则分散度越差，长径比相同时，纤维直径越小，分散度越差。综上所述，影响分散度的因素主要有搅拌情况、捣固方式、纤维形状尺寸及掺入率。

纤维在混凝土中的配向也是很重要的，如果纤维分布于受拉区并按受拉方向定向排列，则增强效果将大大加强，影响纤维配向的因素主要有振捣方式、构件尺寸、纤维形状尺寸、混凝土基体的配合比等。

振捣方式：在进行振动捣固时，纤维就会发生与模板平行、与重力作用方向垂直以及与振动方向平行的倾向。这些倾向随着振动频率的增大和振动时间的加长而增长。

构件尺寸：由于接近模板面的纤维有平行于模板面的倾向，所以构件断面越小，纤维越是沿构件纵长方向配置。钢纤维混凝土的“尺寸效应”较大，在进行强度试验时应特别注意。

纤维的形状尺寸及掺量：在进行捣固时，长径比越大，纤维越易向某个特定方向配置，钢丝切断纤维的这种倾向比剪切纤维更为明显。

混凝土基体的配比：混凝土基体配比中，砂率、粗集料最大粒径、水灰比、用水量等参数都将对纤维的配向起一定影响。

5. 纤维与基体间的粘结强度（τ）

钢纤维混凝土破坏时，大都是纤维被拔出，而不是钢纤维被拉断，因此，纤维与基体的粘结强度是影响强度的主要因素之一。

纤维与基体间的粘结强度与下列因素有关：

钢纤维的长径比：长径比大，则纤维的粘结长度大，钢纤维增强作用随长径比增大而提高，钢纤维长度太短不起增强作用，但太长则会影响拌合物和易性和施工质量，导致强度降低。直径太细，在拌合中又易弯折，太粗时，同样体积率时增强效果差。所以，纤维长度一般为 20～50mm，直径在 0.3～0.8mm，长径比一般为 40～100。

纤维形状与品种：圆直纤维粘结性能较差，其次为两端带钩的纤维，变截面纤维和波形纤维较好。

纤维品种不同，粘结强度最大可相差 1 倍以上。

二、钢纤维混凝土的界面性能

（一）钢纤维与混凝土的界面性能

一般情况下，钢纤维——水泥基的界面的水灰比较基体的水灰比要大，因而造成水膜层厚度增大，离子浓度降低，钙矾石和 $Ca(OH)_2$ 晶体在生长过程中，将无约束地使晶体生长得很大，而且易于在钢纤维表面定向排列，在钢纤维与水泥基体界面上形成 $Ca(OH)_2$ 晶体富浆层，纤维周围 10μ 范围 $Ca(OH)_2$ 的浓度比远处大 20%～40%，从而使界面空隙率也增大，并妨碍了水化硅酸钙凝胶与纤维表面的接触。同时，由于界面过渡区中离子浓度下降，水化生成的水化硅酸钙凝胶减少，使得凝胶与纤维表面接触点减少。因此，界面形成疏松的网格结构，存在大量缺陷，是最薄弱区，界面粘结强度下降，纤维容易由此脱粘。要强化薄弱区，必须减少 $Ca(OH)_2$ 含量，打乱其取向性，降低空隙率。影响界面区性能的因素有基体性能、纤维间距、外掺料等。

1. 基体性能

有研究表明，降低水灰比，减小水膜层，改善过渡环性状是发挥界面效应的主要措施。基体改变对界面过渡环的影响规律是：随着水灰比的增大，过渡环范围变大；最薄弱点与纤维表面的距离增大；显微硬度值降低。当在基体中加入外加剂（如减水剂）后，由于减水剂的减水效果，与其有相同流动度的水泥基体相比，显微硬度值会提高，过渡环范围变小，最薄弱点的显微硬度增大。水灰比的降低，有效的提高了界面结构的密实性及连续性，使界面粘结强度提高。

2. 纤维间距

通常，纤维、集料与水泥基材界面层的厚度为 50～100μm，它主要随基材性能而变化。

假定两纤维在一个平面之内且相互平行时，实验研究表明，当纤维间距大于 2 倍界面层厚度时，界面层保持原有形状和特性；当纤维间距等于 2 倍界面层厚度时，两界面层相切，彼此无影响；当纤维间距小于 2 倍界面层厚度时，则引起离子浓度变化，界面层显示叠加效应，对界面层产生明显的强化效应。对钢纤维混凝土来说，如果纤维及其相应的界面过渡区均属子三维随机分布状态，则在此空间体系内密布着来自不同方向的钢纤维，和许多来自空间不同方向的界面过渡层，它们本身都有各自的离子浓度曲线，在过渡层形成过程中，各最薄弱点有可能与比它强的点相遇，产生不同程度的相互交错和叠加效应。从而产生强化效果，虽然在空间各界面过渡层叠加后也会有某些强点变弱，但就最薄弱点而言均趋于增强，这种效应随纤维体积率增大而提高，随基体性能改善而增强。

3. 其它因素

不同掺量的聚合物对界面最薄弱层的显微硬度有影响。钢纤维与水泥基材界面层的厚度为 50～100μm，界面最薄弱点与钢纤维表面的距离是 20～35μm，这些数值随基体增强而减小。当基材中的聚合物掺量提高，水灰比减小时，基材和界面最薄弱层显微硬度均相应提高。

硅灰掺量对界面层有非常明显的影响。界面最薄弱层显微硬度随硅灰取代水泥量的增大而提高，同时，硅灰对低水灰比的水泥基材具有更明显的增强效果。

硅灰和聚合物是两种不同性质的材料，它们从不同的角度对界面层产生有益的影响。硅灰主要是由高含量的无定形球状玻璃体的 SiO_2 所组成，SiO_2 含量达 90%～95%，它具有巨大的比表面积，一般可达 20～26m^2/g，比水泥大 60～70 倍，粒径为 0.01～1.0μm，为水泥粒径的 1/50～1/100，其中小于 0.1μm 的颗粒约占 70%左右。这些极细的玻璃球具有很高的活性，当硅灰掺量适当时，在水泥基材中，起到消除因 $Ca(OH)_2$ 的取向和富集对界面层的不利影响。同时，硅灰中的活性 SiO_2 与 $Ca(OH)_2$ 作用生成的水化硅酸钙凝胶堵塞了界面层空隙，隔断了界面层微缝的连通，构成了少含或不含 $Ca(OH)_2$ 的界面致密结构。面聚合物属表面活性物质，除有良好的减水效果外，还有粘附及成膜效应，对减薄水膜层厚度、缩小界面层与基体水灰比之差、增进与钢纤维表面的粘附均具有重要作用。尤其在水泥拌和过程中，聚合物粒子吸附子水泥颗粒和钢纤维表面，在水泥水化时，聚合物失水并形成聚合物膜，与水泥基材在界面处也互成连续相。聚合物弹性模量低，界面层内部应力状态得到改善，界面层应力减少，限制了裂缝的产生。纤维状聚合物粒子还可能跨越界面层微裂缝，起架桥和填充作用。

（二）影响钢纤维与混凝土粘结性能的因素

由于界面层薄弱而引起界面粘结强度降低，影响了钢纤维的增强、增韧和阻裂效应。提高界面粘结强度的主要途径是减薄水膜层厚度，改善界面层形状与结构以强化界面层，使各不同性质的组成材料通过界面层强化形成整体，充分体现出复合材料的优良特性。影响钢纤

维粘结性能的因素既有基体参数又有钢纤维特征参数的作用，分述如下：

1. 基体性能

界面效应是基体与纤维相互作用的结果，基体性能直接关系到钢纤维的增强作用。基体水灰比是影响界面效应的一个重要因素。实验表明，界面粘结强度随水灰比增大而减少，如在基体中掺入不同量的其它物质如丙烯共聚乳液（简称 PAE）或减水剂后，拔出功（拔出力与位移曲线包围的面积）随基体强度的提高而增大。这是由于水灰比的变化及外加剂的掺入，使界面组成结构发生改变。降低水灰比，减弱了钢纤维的水膜层厚度，改善了钢纤维周围过渡区（环）性状，提高了界面粘结强度。

2. 纤维长度

由于纤维的几何尺寸和表面形状的不同，其粘结性能有很大差别，对单根纤维进行拔出试验得出，当纤维长度较短，小于临界长度时，达到最大荷载以前，纤维基本上是线弹性变形，达到最大荷载时，纤维被拔出；当纤维长度约等于临界长度时，由于纤维长度增长，与基体的粘结面增大，粘结强度增大，此时，纤维能够维持到应力几乎接近其抗拉强度时才被拔动，拔动之前纤维已发生屈服。纤维发生屈服是在纤维与周围混凝土逐渐脱粘的过程中进行的。纤维是在带有径缩的情况下被逐渐拔出的。当纤维长度大于临界长度时，纤维不是被拔出而是被拉断。由此可看出，粘结强度随纤维长度的增加而增大。在钢纤维混凝土中，由于施工等方面原因，纤维长度一般都较短，通常是发生拔出破坏。

3. 纤维外形

钢纤维与基体的界面粘结强度不仅取决于两种材质间的粘着力，与两种材料的相互机械咬合力也有很大关系。这种机械咬合力主要取决于钢纤维的外形特征。平直纤维的增强作用是借助于钢纤维与基体界面上的粘着力将钢纤维与基体联结成整体。纤维与基体接触表面积越大，纤维的粘结力也就越大。表面凹凸不平的钢纤维，在纤维与基体界面形成了较强的机械咬合，提高了钢纤维与基体的界面粘结强度，使钢纤维不易脱粘。

改善纤维与基体间的粘结强度的方法主要有三种：一是增加纤维的粘结长度（即增加长径比）；二是改善基体对钢纤维的粘结性能，通过加入聚合物、减水剂等方法降低基体水灰比，增强其粘结性能；三是改善纤维的形状，增加纤维与基体的摩阻和咬合力，来达到加强粘结强度的目的。

第三节　钢纤维混凝土的设计应用

一、钢纤维混凝土的组成材料

钢纤维混凝土作为一种新型复合材料，是由钢纤维与基体两部分组成的，各组成部分的性质决定了钢纤维混凝土的各项性能，为保证钢纤维混凝土在施工及使用中能具有良好性能，所用材料必须满足要求。

（一）钢纤维

1. 钢纤维的种类

配制钢纤维混凝土用的钢纤维，按《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》(ECS38-92) 规定，可按表 3-5 规定划分。

表 3-5 中所列三种钢纤维是目前国内较常用的，除此之外，国外已开发出一些性能优良的

其它品种，如波形纤维、变截面纤维、骨棒形纤维等。常用的制造钢纤维的方法有：钢丝冷拔法、薄钢板剪切法、熔钢抽出法和机床加工法。

钢纤维类型[24]　　表 3-5

类型号	类型名称	截面形状	长度方向形状
Ⅰ	圆直型	圆形	直
Ⅱ	熔抽型	月牙形	直
Ⅲ	剪切型	矩形	直、扭曲或两端带钩

2. 钢纤维应具备的性质

1）钢纤维的形状尺寸及偏差应满足下列规定：

钢纤维长度可分为 20mm、25mm、30mm、35mm、40mm、45mm、50mm 各种不同规格。

钢纤维截面的直径或等效直径应在 0.3～0.8mm 的范围内，当钢纤维的长度和直径超出规定范围时，应通过专门的试验论证，满足设计要求时方可使用。

钢纤维长度偏差（指抽样检验时样品长度平均值与公称值之差，并非每个纤维实测长度与公称值之差）不应超过长度公称值的±5%。

2）钢纤维的质量

钢纤维直径大小影响到长径比变化，从而影响其增强效果，但由于直径很细小，加上有不规则截面，使量测困难，因此采用质量偏差来控制直径或等效直径的尺寸偏差。钢纤维的质量偏差不应超过按尺寸公称值计算质量的±15%。

3）钢纤维的强度

钢纤维的抗拉强度不应低于 3.8MPa，即不低于低碳钢验收标准的废品值。

4）钢纤维杂质

钢纤维中的杂质可分为两类：一类是妨碍钢纤维与基体粘结的，如粘结在纤维表面的油污、有机质粘液等有害成分；另一类是占有纤维质量而不起增强作用，甚至能破坏基体整体性的杂质，如多个纤维粘在一起的片体或块体、表面严重锈蚀的纤维、铁屑以及混入的杂草、木屑、泥土等。配制钢纤维混凝土的钢纤维表面不得粘有第一类杂质，第二类杂质的总质量不应超过钢纤维质量的 1%。

3. 钢纤维的几何参数

钢纤维的几何参数可按表 3-6 选用。

钢纤维几何参数采用范围　　表 3-6

钢纤维混凝土结构类别	长度（mm）	直径（等效直径）（mm）	长径比
一般浇筑成型的结构	25～50	0.3～0.8	40～100
抗震框架节点	40～50	0.4～0.8	50～100
铁路轨枕	20～30	0.3～0.6	50～70
喷射钢纤维混凝土	20～25	0.3～0.5	40～60

（二）基体材料

拌制钢纤维混凝土的基体材料与普通混凝土相同，其中：

细骨料：不得采用海砂，级配应符合现行标准《普通混凝土用砂标准检验方法》的规定。

粗骨料：最大粒径根据具体情况选用，一般不宜大于 20mm 和钢纤维长度的 2/3。

水：不得 采用海水。

外加剂：宜选用优质减水剂，对抗冻性有要求的钢纤维混凝土宜选用引气减水剂。外加

剂的性能应符合现行标准《混凝土外加剂应用规程》的规定，并经试验验证后方可采用。严禁掺加氯盐。

钢纤维混凝土所用水泥、水、骨料、外加剂、混合材料等除应符合上述规定外，还应符合现行有关规范中关于混凝土所用原材料的规定。

二、道路用钢纤维混凝土的组成设计[24]

目前，钢纤维混凝土在道路工程中应用最为广泛，本节只对道路中所用钢纤维混凝土的配合比设计进行介绍。

（一）基本要求

配合比设计应满足的基本要求为：

1. 满足结构设计要求的抗折强度与抗压强度；
2. 满足施工要求的和易性；
3. 在某些条件下还应满足对抗冻性、抗渗性、耐冲刷或耐腐蚀性等方面的要求；
4. 符合合理使用材料，降低造价的原则。

（二）设计参数的确定

1. 纤维体积率的确定

钢纤维体积率可通过下面两种方法确定。

1）根据钢纤维混凝土的设计强度、所用材料、施工方法等，按已有资料确定。一般纤维体积率不应小于0.5%，并应符合表3-7的规定。

钢纤维体积率采用范围 表3-7

钢纤维混凝土结构类别	钢纤维体积率
一般浇筑成型的结构	0.5～2.0
局部受压构件、桥面、预制桩桩顶桩尖	1.0～1.5

2）根据钢纤维混凝土的设计强度按公式计算：

$$f_{ftm} = f_{tm}(1 + \alpha_{tm}\lambda_f) \tag{3-6}$$

将式（3-5）代入上式后得出：

$$V_f = \frac{d_f}{L_f \alpha_{tm}}\left(\frac{f_{ftm}}{f_{tm}} - 1\right) \tag{3-7}$$

式中：V_f——钢纤维体积率（%）；

d_f——钢纤维直径（或等效直径）（mm）；

L_f——钢纤维长度（mm）；

α_{tm}——钢纤维对抗折强度的影响系数，通过试验确定，当f_{tm}＜6.0MPa时，可按表3-8选用；

f_{ftm}——钢纤维混凝土抗折强度设计值（MPa）；

f_{tm}——同强度等级素混凝土抗折强度设计值，按现行有关水泥混凝土路面或机场道面设计规范的规定采用（MPa）。

钢纤维对抗折强度的影响系数 表3-8

钢纤维品种规格	熔抽型（L_f＜35mm）、圆直型	熔抽型（L_f≥35mm）、剪切型
α_{tm}	0.52	0.73

2. 单位用水量的确定

单位用水量，可通过试验或根据已有经验确定，也可根据材料品种规格、钢纤维体积率、水灰比和稠度参照表 3-9 或表 3-10 选用；也可根据公式求得：

$$VB = 0.191e^{(44.38 \times V_f - 722.38/W)} \tag{3-8}$$

式中：VB——拌合物所需工作度（维勃秒），一般取 VB 为 10～30s。

半干硬性钢纤维混凝土单位体积用水量选用表

表 3-9

拌合料条件	维勃稠度（s）	单位体积用水量（kg）
$V_f=1.0\%$	10	195
砂石最大粒径 10～15mm	15	182
$W/C=0.4$～0.5	20	175
中砂	25	170
	30	166

注：①碎石最大粒径为 20mm 时，单位体积用水量相应减少 5kg；

②粗骨料为卵石时，单位体积用水量相应减少 10kg；

③钢纤维体积率每增减 0.5%，单位体积用水量相应增减 8kg。

塑性钢纤维混凝土单位体积用水量选用表

表 3-10

拌合料条件	骨料品种	骨料最大粒径（mm）	单位体积用水量（kg）
$L_f/d_f=50$	碎石	10～15	235
$V_f=0.5\%$		20	220
坍落度＝20mm	卵石	10～15	225
$W/C=0.5$～0.6		20	205
中砂			

注：①坍落度变化范围为 10～50mm 时，每增减 10mm，单位用水量相应增减 7kg；

②钢纤维体积率每增减 0.5%，单位体积用水量相应增减 8kg；

③钢纤维长径比每增减 10，单位体积用水量相应增减 10kg。

当在纤维混凝土中掺用外加剂时，单位用水量应通过试验确定。

3. 砂率的确定

钢纤维混凝土的砂率可通过试验或根据已有试验确定，也可根据钢纤维混凝土所用材料的品种规格、钢纤维体积率、水灰比等，查表 3-11 选用。

钢纤维混凝土砂率选用值（%）

表 3-11

拌合料条件	最大粒径 20mm 的碎石	最大粒径 20mm 的卵石	拌合料条件	最大粒径 20mm 的碎石	最大粒径 20mm 的卵石
$L_f/d_f=50$	50	45	L_f/d_f 增减 10	±5	±3
$V_f=1.0\%$			V_f 增减 0.5%	±3	±3
$W/C=0.5$			W/C 增减 0.1	±2	±2
砂细度模数＝3.0			砂细度模数增减 0.1	±1	±1

（三）设计步骤

1. 确定试配强度 R_{CW}

道路用钢纤维混凝土以抗折强度为指标。抗折强度配制强度的提高系数参照抗压强度配制提高系数确定。

2. 确定钢纤维体积率

根据表 3-7 选用或根据公式求出。

3. 确定单位用水量

根据表 3-9、表 3-10 或用公式求出。

4. 计算水灰比

水灰比可根据下式求得：

$$R_{CW} = K_c R_{cb}(0.082C/W + 0.08V_f L_f/d_f - 0.0801) \tag{3-9}$$

式中：R_{CW}——钢纤维混凝土抗折试配强度（MPa）；

K_c——水泥富余系数，一般取 $K_c=1.13$；

R_{cb}——水泥标号（MPa）；

V_f——钢纤维体积率（%）；

L_f——钢纤维长度（mm）；

d_f——钢纤维直径（或等效直径）（mm）；

C/W——灰水比。

5. 计算水泥用量：根据已确定的水灰比及单位用水量计算水泥用量。

6. 确定砂率

砂率可参照表 3-11 选用，或根据经验确定。

7. 计算粗、细骨料用量

用绝对体积法或假定体积密度法，用与普通素混凝土相同的方法确定初步配合比。

8. 试配调整

1）按试配配合比进行拌合物性能试验，调整单位体积用水量和砂率，确定强度试验用基准配合比。

2）钢纤维混凝土强度检验：检验抗折强度，同时校核抗压强度，每种强度试件至少三组（每组 3 个），其中一组为基准配合比。当进行抗压强度试验时，另外二组配合比 W/C 应较 基准配合比增加或减少 0.05；当进行抗折强度试验时，另外二组配比的 V_f 较基准配合比增加或减少 0.2%。改变水灰比或钢纤维体积率时，单位体积用水量保持不变，可通过调整砂率来保持拌合物的稠度不变。

9. 确定施工配比

根据强度试验结果调整水灰比和钢纤维体积率，按与普通混凝土相同的方法确定施工配比。

三、钢纤维混凝土的施工

1. 搅拌工艺

钢纤维混凝土要能充分发挥其特性，其关键在于保证钢纤维在混凝土中成均匀的三维乱向分布状态。在混凝土拌和时，要防止钢纤维成团集聚，影响施工和易性，应注意以下几点：

1）搅拌设备

搅拌是保证钢纤维在混凝土中均匀分布的重要环节，因此，钢纤维混凝土施工宜采用机械搅拌，可以使用普通搅拌机或强制式搅拌机。实践证明，强制式搅拌机效果较好，其中水平双轴型搅拌机更为适宜。当钢纤维率较高，稠度较大时，搅拌机一次搅拌量不宜大于其额定搅拌量的 80%。

2）投料顺序和方法

钢纤维混凝土搅拌的投料次序和方法应以搅拌过程中钢纤维不产生结团和保证一定的生产率为原则。目前，施工中较常用的方法有三种。一种是先干拌后加水的方式：这种方法是按砂、石、水泥、钢纤维的顺序，将材料加入搅拌机中，干拌时间不宜少于 1.5min，再加水湿拌，搅拌时间通过现场搅拌试验确定。第二种方法是将钢纤维以外的材料按普通混凝土的方法先湿拌，投料顺序为水泥、粗细骨料、水。在拌合过程中，分散加入钢纤维。这时，为保证钢纤维均匀分散，宜采用分散机投放钢纤维。第三种方法是采用自落式搅拌机，先投 50% 的砂和 50%的石料，与钢纤维干拌均匀，再投入水泥、其余骨料和水一起湿拌均匀。为保证

搅拌均匀，搅拌时间应较普通混凝土拌合时间延长。根据施工经验，三种方法中宜优先采用先干拌后加水湿拌的方法。

2. 运输、浇筑及养护

1）运输

为避免运输过程中产生的振动使钢纤维下沉，造成拌合物离析，从而影响拌合料的均匀性，钢纤维混凝土在运输过程中应尽量缩短运送时间和距离。如已产生离析，应作二次搅拌。

2）浇筑

浇筑和振捣是施工中的重要环节，直接影响钢纤维混凝土的整体性和致密性，在振捣过程中，由于振捣作用，钢纤维有在与浇筑方向垂直的平面内成二维分布的趋势、沿模板平面取向的趋势和沿振捣棒捣入方向排列的趋势，影响了钢纤维在混凝土中的分布和取向。另外，振捣时间过长也会引起钢纤维下沉而分布不均。因此，在振捣过程中应采用机械振捣，严禁人工振捣，以避免振捣方法不当而产生的对钢纤维分布和取向不利的影响。公路路面、机场跑道及桥面用钢纤维混凝土的振捣和整平的具体步骤如下：

(1) 先用平板式振捣器振捣密实，然后用振动梁振捣整平；

(2) 用表面带凸棱的金属圆滚将表面滚压平整。钢纤维混凝土表面无泌水时用金属抹刀抹平，不使表面有裸露的钢纤维和浮浆。

(3) 在初凝前进行拉毛处理。拉毛工具可用刷子和压滚，不要用木刮板、粗布路刷和竹扫帚，以免将钢纤维带出。同时，为防止钢纤维混凝土构件的棱角及尖角处钢纤维的集中和外露，在施工中应将所用的模板修圆。必要时用附着式振捣器振动模板，迫使钢纤维离开模板．这样可以有效地防止钢纤维外露。

3）养护

采用与普通混凝土相同的养护方法，但钢纤维混凝土的早期强度较高，应加强早期湿养护并保持一定养护温度。

四、钢纤维混凝土在道路工程中的应用

钢纤维混凝土用于修筑路面或机场道面，主要有两种形式：一种是直接铺筑在基层之上的单层钢纤维混凝土路面，称为全截面钢纤维混凝土，一般用于新建道路，特别适合某些高程受限制的工程；另一种是双层式混凝土路面，即在素混凝土路面之上（或之下）铺筑钢纤维混凝土薄层，称为复合式钢纤维混凝土，可以用于新路修建，也可作为旧路加固层。

钢纤维混凝土应用于路面、飞机跑道，其主要优点有以下几点：

1. 可减薄铺设厚度

普通混凝土是脆性材料，其抗折强度低，抵抗冲击疲劳性能差，难以适应行车和地基内的复杂应力状态，出现开裂、破碎以至折断。根据计算，铺筑路面厚度约为 20～26cm。钢纤维混凝土由于韧性好，抗裂能力强，抗折强度、抗冲击疲劳性能都明显优于普通混凝土，因此铺筑厚度一般可比普通混凝土路面减少 40%～50%，通常为 11～16cm。表 3-12 根据有关资料列出依照交通量级别普通混凝土路面与钢纤维混凝土路面厚度的比较。

2. 可加大缩缝间距

由于钢纤维在混凝土中具有对早期裂纹的阻滞作用，钢纤维混凝土路面的缩缝间距可以大幅度增加，通常情况下，普通混凝土路面的缩缝间距为 5～6m，钢纤维混凝土路面的缩缝间距可增加到 15～60m，比普通混凝土路面的缝距大 5～6 倍。路面的胀缝可以不设置，如高

速公路和汽车专用公路在中央分隔带两侧整板浇注，不设纵缝。由于缩缝减少，可以提高行车舒适度，同时，车辆通过工作缝时，还有减轻产生噪声影响的优点。

普通混凝土路面与钢纤维混凝土路面厚度比较　　表 3-12

交通量级别	双车道标准轴作用次数（次/日）	普通混凝土设计厚度（h）（cm）	钢纤维混凝土路面设计厚度 h_f（cm）		
			钢纤维体积率 V_f（%）		
			1.0	1.5	2.0
特重	3000	27	16	14	13
重	1500	24	15	13	12
中等	500	22	14	13	11
轻	200	20	13	12	11

3. 可显著延长路面使用寿命

由于钢纤维混凝土约束裂纹的能力强，其延韧性、抗裂性好，无论高温热胀、冻雪冻融以及车辆冲击和重复疲劳荷载作用下，钢纤维混凝土底面产生裂纹的速度要缓慢得多。而且路面出现的裂纹与普通混凝土产生的裂纹情况也不相同：钢纤维能阻止裂纹的扩展，把集中的宽裂纹分散成纤细裂纹，因而路面不出现横贯裂缝，而且不会发展到板的边缘，路面板边及转角处也不易出现剥落。因此，钢纤维混凝土路面寿命大为延长，养护维修远比普通混凝土路面优越。

随着科学技术的发展，钢纤维混凝土在公路路面、桥面铺装、隧道衬砌等方面得到了越来越广泛的应用。近二十多年，在英国、日本、德国、美国等用于路面工程已相当广泛，美国已在 100 多个机场跑道应用钢纤维混凝土。我国从 70 年代初以来，也开始了这方面的研究，并先后在十几个省市铺筑了试验路，有的已付诸于实际施工应用。山东境内泰安至磁窑段 104 国道上[25]，加固修补桥涵铺装层和部分沉陷的混凝土路面板块使用的就是钢纤维混凝土。其配合比为水泥用量 387kg/m^3，钢纤维体积率 1.0%，砂率为 0.4，水灰比为 0.46，经行车观察，未发现任何病害，表现出良好的使用效果。上海虹桥机场高架车道钢纤维混凝土道面共 6400m^2，实际浇筑厚度根据底层平整情况在 10～25cm 范围内，施工配比为：水灰比 0.5，钢纤维体积率 1.25%，水泥用量 400kg/m^3。大庆的试验段长 500m，宽 7m，纤维掺量为 0.8%，路面厚 12cm，与厚 24cm 的普通混凝土路面相比，造价接近，经一年多营运，路面无裂缝，无破碎，状况良好。目前，我国每年生产的碳钢纤维约有 40%用于路面工程。

第四章　土工合成材料

土工合成材料是一种新型的岩土工程材料。它以人工合成的聚合物，如塑料、化纤、合成橡胶等为原料，制成各种类型的产品，置于土体内部、表面或各种土体之间，发挥加强或保护土体的作用。

本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。

第一节　土工合成材料的基本概念

一、土工合成材料种类

土工合成材料可分为土工织物、土工膜、特种土工合成材料和复合型土工合成材料等类型。特种土工合成材料包括：土工格栅、土工网、土工垫、土工格室、土工泡沫塑料等。复合型土工合成材料是由上述各种材料复合而成，如复合土工膜、土工复合排水材料等[27]。目前，这些材料已广泛地用于水利、水电、公路、建筑、海港、采矿、军工等工程的各个领域。

二、土 工 织 物

土工织物为透水性土工合成材料。土工织物的制造一般要经过两个步骤：首先把聚合物原料加工成丝、短纤维、纱或条带，然后再制成平面结构的土工织物。许多不同的高分子聚合物已经用于不同土工织物产品的原料。按制造方法分为针织型、无纺或非织造型和机织或有纺型三类土工织物[28]。针织型目前已很少应用。有纺土工织物由两组平行的呈正交或斜交的经线和纬线交织而成，其主要缺点是沿经线和纬线的强度高，而与经纬线斜交方向的强度低。无纺土工织物是把纤维作定向的或随意的排列，再经过加工而成。按照联结纤维的方法不同，可分为化学（粘结剂）联结、热力联结和机械联结三种。无纺土工织物主要优点是强度没有显著的方向性，对变形的适应性较大。当前世界上80%的土工织物属于这种类型。

土工织物突出的优点是质量轻，整体连续性好（可作成较大面积的整体），施工方便，抗拉强度较高，耐腐蚀和抗微生物侵蚀性好；缺点是未经特殊处理，则抗紫外线能力低，如暴露受到紫外线直接照射容易衰化，但如不直接暴露，抗老化及耐久性能仍是较高的。土工织物的性能与其聚合物原料、土工织物的种类及加工制造方法密切相关。

三、土　工　膜

土工膜一般分为沥青和聚合物（合成高聚物）两大类。也有采用天然橡胶制作的。为了适应工程应用中不同强度和变形的需要，两类中又各有不加筋和加筋或组合的类型。土工膜的制造方法一般分为工厂制成的和现场制成的两种。

含沥青土工膜目前主要为复合性的（含编织型或无纺型的土工织物），沥青作为浸润粘结

剂。聚合物土工膜根据不同的主材料分为塑性土工膜、弹性土工膜和组合型土工膜。

土工膜的一般特性包括物理性能、力学性能、化学性能、热学性能和耐久性等。工程应用中更重视其防水（渗透性和透气性）、抗老化的能力及耐久性。大量工程实践表明，土工膜有很好的不透水性，很好的弹性和适应变形的能力，能承受不同的施工条件和工作应力，具有良好的耐老化能力（处于水下和土中的土工膜的耐久性尤为突出）。总之可以认为土工膜具有突出的防渗和防水性能。

土工膜的特性随其类别、制作方法、产品类型的不同而变化较大。

四、特种土工合成材料

（一）土工格栅

土工格栅是一种主要的土工合成材料，与其它土工合成材料相比，它具有独特的性能与功效。土工格栅常用作加筋土结构的筋材或土工复合材料的筋材等，国内外工程中大量采用土工格栅加筋路基路面。土工格栅分为两类：塑料类和玻璃纤维类[30]。

1. 塑料类

此类土工格栅是经过拉伸形成的具有方形或矩形格栅的聚合物网材，按其制造时拉伸方向分为单向拉伸和双向拉伸两种。它是在经挤压制出的聚合物板材（原料目前多为聚丙烯或高密度聚乙烯）上冲孔，孔的形状、大小及布置按最终制成的土工格栅产品确定，然后在加热条件下施行定向拉伸。单向拉伸格栅只沿板材长度方向拉伸制成，双向拉伸格栅则是继续将单向拉伸的格栅再在与其长度垂直的方向拉伸制成。

由于这种格栅制造中聚合物的高分子随加热延伸过程而重新排列定向，加强了分子链间的联结力，从而达到提高其强度的目的，但其延伸率却只有原板材的 10%～15%。土工格栅的强度随温度的升高而降低，变形增大；反之则相反。

由子土工格栅中加入了炭黑等抗老化材料，使它具备了较好的耐酸、耐碱、耐腐蚀和抗老化等耐久性能。

2. 玻璃纤维类

此类土工格栅是以高强度玻璃纤维为材质，有的配合自粘感压胶和表面沥青浸渍处理，使得格栅可和沥青路面紧密结合成一体。如加拿大贝密斯有限公司生产的自粘式玻璃纤维增强网栅具有易建性、符合环保要求、熔点高和耐腐蚀等优点。

由于土石料在格栅网格内互锁力增高，它们之间的摩擦系数显著增大（可达 0.8～1.0），土工格栅埋入土中的抗拔力由于格栅与土体间的摩擦咬合力较强面显著增大，因此它是一种很好的路用加筋材料。同时土工格栅是一种质量轻，具有一定柔性的塑料平面网材。易于现场裁剪和连接，也可重叠搭接，施工简便，不需要特殊的施工机械和专业技术人员。

（二）土工膜袋

土工膜袋是一种双层聚合化纤织物制成的连续（或单独）袋状材料。它可以代替模板用高压泵把混凝土或砂浆灌入膜袋中，最后形成板状或其它形状结构。用于护坡或其它地基处理工程。膜袋根据其材质和加工工艺的不同，分为机制和简易膜袋两大类。机制膜袋按其有无反滤排水点和充胀后的形状又可分为反滤排水点膜袋、无反滤排水点膜袋、无排水点混凝土膜袋、铰链块型膜袋及框格型膜袋。反滤点的作用是为了排除土中渗水，而又不让充填的砂浆侵入。

（三）土工网

土工网是合成材料条带、粗股条编织或合成树脂压制的具有较大孔眼、刚度较大的平面结构或三维结构的网状土工合成材料，用于软基加固垫层、坡面防护、植草以及制造组合土工材料的基材。

土工网特性随网孔形状、大小、厚度以及制造方法的不同差别很大，特别是力学性能。国内及国外许多土工网产品的抗拉强度和模量较低，特别是延伸率较大，作为加筋用时应慎重考虑。

（四）土工垫和土工格室

土工垫和土工格室都是合成材料特制的三维结构。前者多为长丝结合而成的三维透水聚合物网垫，后者是由土工织物、土工格栅或土工膜、条带聚合物构成的蜂状或网格状三维结构，常用作防冲蚀和保土工程，刚度大的、侧限能力高的多用于地基加筋垫层或支挡结构中。

五、复合型土工合成材料

土工织物、土工膜和某些特种土工合成材料，以其两种或两种以上的材料互相组合起来，成为复合型的土工合成材料。复合型土工合成材料可将不同构成材料的性质结合起来，更好地满足具体工程的需要。如复合土工膜，将土工膜和土工织物按要求制成土工膜—土工织物组合物，称复合土工膜。土工膜主要用来防渗，土工织物起加筋、排水和增加土工膜与土面之间的摩擦力的作用。又如土工复合排水材，它是以无纺土工织物和土工网、土工膜或不同形状的合成材料芯材组成的排水材料，用于软基排水固结处理、路基纵向横向排水、建筑地下排水管道、集水井、支挡建筑物的墙后排水、隧道排水、堤坝排水设施等。道路工程中常用的塑料排水板就是一种土工复合排水材。

第二节　土工合成材料的工程特性

一、物 理 特 性

（一）厚度

土工合成材料厚度用 mm 表示。厚度变化对织物的孔隙率、透水性和过滤性等水力学特性有很大的影响。常用的各种土工合成材料的厚度：土工织物一般为 0.1～5mm，最厚的可达十几毫米；土工膜一般为 0.25～0.75mm，最厚的可达 2～4mm；复合型材料有时采用较薄的土工膜，最薄可达 0.1mm；土工格栅的厚度随部位的不同而异，其肋厚一般由 0.5mm 至几十毫米。

有些材料在受压时，厚度变化很大，需规定在某固定压力下测定厚度。一般规定此压力为 2kPa。根据工程需要还应测试在 20kPa、200kPa 压力下的系列厚度。土工织物厚度可采用专门的厚度测试仪，土工膜厚度可直接用千分尺测定。一般要求加压面积为 25cm^2，试样面积应大于加压面积的 2 倍，加压时间 30s，试样不少于 10 块。

（二）单位面积质量

单位面积质量为单位面积土工合成材料具有的质量，它反映材料多方面的性能，如抗拉强度、顶破强度等力学性能以及孔隙率、渗透性等水力学性能。它是土工合成材料的主要物理性能之一，通常以 g/m^2 表示。

土工织物和土工膜单位面积质量受原材料比重的影响，同时受厚度、外加剂和含水量的

影响。常用的土工织物单位面积质量一般在 50～1200g/m² 的范围内。

测定单位面积质量采用秤量法。试样面积为 100cm²，数量不得少于 10 块，天平秤量读数应精确到 0.01g（现场测试为 0.1g），测试前要求试样在标准大气压下恒温（20±2℃），恒湿（65±2%）24h。

二、力学特性

反映土工合成材料力学特性的指标主要有：抗拉强度、撕裂强度、顶破强度、刺破强度、穿透强度及握持强度等。

（一）抗拉强度

土工合成材料是柔性材料，大多通过其抗拉强度来承受荷载以发挥工程作用。因此，抗拉强度及其应变是土工合成材料主要的特性指标。

土工合成材料的抗拉强度与测定时的试样宽度、形状、约束条件有关，必须在标准规定的条件下测定。土工织物在受力过程中厚度是变化的，不易精确测定，故其受力大小一般以单位宽度所承受的力来表示，单位为 kN/m 或 N/m，而不是以习惯上所用的单位面积的应力来表示。

目前，测定抗拉强度基本上是沿用纺织品条带拉伸试验方法，即把试样两端用夹具夹住，以一定的速率施加荷载进行拉伸直到破坏。测得试样自身断裂强度及变形，并绘出应力——应变曲线。为了使试验结果尽可能接近实际情况，减小颈缩影响，一种办法是加宽试样，另一种是采用平面应变拉伸试验方法。但后者比较麻烦，常规拉伸试验中不常采用。目前条带拉伸试验的试样分宽条与窄条两种。宽条试样宽 200mm、长 100mm，宽长比 $B/L=2$；窄条试样宽 50mm、长 100mm，宽长比 $B/L=1/2$。试验机具应选择具有等速拉伸性能、能测读拉伸过程中拉力和伸长量或直接记录拉力——伸长关系曲线的拉力机。同时要求试样的最大断裂力在满量程的 10%～90%范围为。国内规定拉伸速率为 50mm/min。

各试样的抗拉强度，可由拉力机上直接读出或从记录曲线上量取，然后用下式计算。

$$T_s = P_f / B \tag{4-1}$$

式中：T_s——抗拉强度（kN/m）；

P_f——测读的最大抗拉力（kN）；

B——试样宽度（m）。

伸长率按下式计算

$$\varepsilon_p = \frac{L_f - L_o}{L_o} \tag{4-2}$$

式中：ε_p——伸长率（%）；

L_o——试样初始长度（mm）；

L_f——对应最大拉力时的试样长度（mm）。

（二）握持强度

土工织物承受集中力的现象普遍存在，握持强度反映其分散集中力的能力。握持强度试验选用的仪器一般与条带拉伸试验相同，但试验方法不同。握持强度试验是握持试样两端部分宽度而进行的一种拉力试验。它的强度由两部分组成：一部分为试样被握持宽度的抗拉强度，一部分为相邻纤维提供的附加抗拉强度。它与条带拉伸强度之间没有简单的对比关系。

由于各单位所采用的试样和夹具的尺寸不尽相同，试验的难度也较大，因此测得的成果

相差很多，一般不宜作为设计依据，只可用作不同土工织物的抗拉强度的比较。

（三）撕裂强度

土工织物和土工膜在铺设和使用过程中，常常会有不同程度的破损。撕裂强度反映了试样抵抗扩大破损裂口的能力，可评价不同土工织物和土工膜被扩大破损程度的难易，是土工合成材料应用中的重要力学指标。

目前，撕裂强度试验沿用纺织品标准测试方法，常用的纺织品撕裂试验，按试样形状分为梯形法、翼形法以及舌形法，舌形法又分为单缝与双缝两种，如图 4-1 所示。目前多采用梯形法测定土工膜及土工织物的撕裂强度。这种试验从其加力方式看，近似于张拉试验。

土工织物梯形撕裂强度值一般为 0.15～30kN，不加筋土工膜的梯形撕裂强度值一般为 0.03～0.4kN。

（四）顶破强度、刺破强度及穿透强度

工程应用中，土工织物及土工膜常被置于两种不同粒径的材料之间，受到粒料的顶破作用。施工中也将受到抛填粒料引起的法向荷载。根据粒径大小形状，土工织物及土工膜按接触面的受力特征和破坏形式可分为顶破、刺破和穿透几种受力状态（图 4-2）。

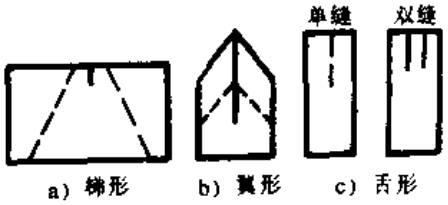


图 4-1 撕裂试验的试样形状

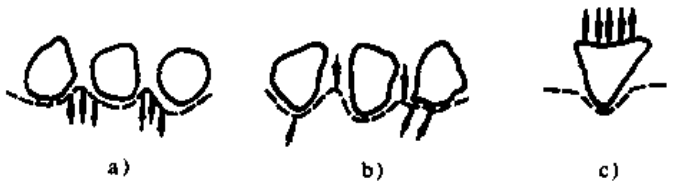


图 4-2 填筑过程中土工织物可能的受力状态
a）顶破；b）刺破；c）穿透

顶破强度是反映土工织物及土工膜抵抗垂直织物平面的法向压力的能力，顶破试验与刺破强度试验相比，压力面积相对较大，材料呈双向受力状态。

刺破强度是反映土工织物或土工膜抵抗小面积集中荷载（如有棱角的石子或树枝等）的能力。

穿透强度通过穿透试验测得。这种试验是模拟工程施工中具有尖角的石块或其它锐利物落在土工织物或土工膜上的情况，用穿透试验所得孔眼的大小，评价土工织物或土工膜抵御穿透的能力。

（五）蠕变特性

材料的蠕变是指材料在受力大小不变条件下，其变形随时间增长而逐渐增大的现象。蠕变特性是土工合成材料的重要特性之一，是材料能否长期使用的关键。

蠕变特性试验目前尚无统一的标准方法，一般采用宽条试样（宽 200mm），以悬吊的金属锤为荷重。施加的荷重分为数级，如 25%、50%及 75%的断裂强度。试验过程中记录不同时间的应变量，绘制不同量级荷重条件下的应变量与时间对数值的半对数曲线，如图 4-3 所示。曲线与纵坐标的交点相当于初始应变量 ε_0，经过 t 时后增加的应变量称为蠕变量，用 ε_t 表示。根据大量试验结果，在一定的应力水平下以半对数表

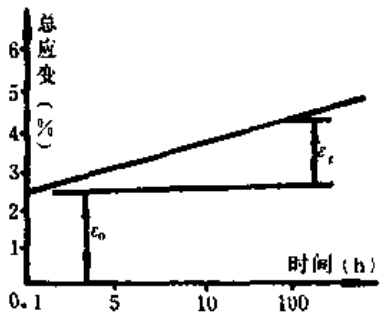


图 4-3 应变—时间对数关系

示的蠕变试验曲线近于直线变化[27][30]。

三、土工合成材料与土相互作用时的界面摩擦特性

把土工合成材料作为加筋材料，埋在土内，或作为滤层铺在土坡上，都将与周围土体形成复合体系。两种材料在外载和自重作用下产生变形时，将沿它们的界面发生相互作用。在实际工程中，土与土工合成材料相互作用的形式有沿界面的相互摩擦或将材料拔出土。

测定土工合成材料与土相互作用的界面摩擦特性的试验，一般采用类似于常规土工试验中的直接剪切仪。而拉拔试验常模拟现场条件，研制出各种不同形式的拉拔试验箱或试验槽。这两种试验虽然均是反映界面摩擦作用，但机理却不尽相同，试验结果存在一定的差异[27][28][32~34]。

（一）直接剪切摩擦试验

两种材料界面上的摩擦特性常以粘着力 C_a 和摩擦角 δ 或似摩擦系数 f^* 表示。摩擦剪切强度符合库仑定律，可表示为

$$\tau = C_a + p \cdot \tan(\delta) = C_a + p \cdot f^* \tag{4-3}$$

式中：τ——界面抗剪强度（kPa）；

C_a——粘着力（kPa）；

δ——摩擦角（°）；

p——法向压力（kPa）；

f^*——似摩擦系数。

直接剪切摩擦试验一般在4种不同压力 p 下进行，测出相应的强度值 τ，然后将试验结果点绘成线，而求出 C_a、δ 或 f^* 值。也可采用最小二乘法进行回归，计算出这些数值。

直剪试验中施加水平荷载方式有应变控制和应力控制两种。应变控制时应保证剪切速率相等，而应力控制时应保持各级垂直荷载不变。国内多采用应变控制法。剪力盒尺寸一般不小于 15cm×15cm，直剪仪示意图见图 4-4。

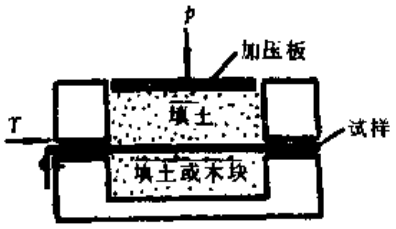


图 4-4　直剪仪示意图

织物与土之间的粘着力一般很小，常常可以忽略不计。而土工格栅与土之间的咬合力较大。土与土工合成材料之间的摩擦角与土的颗粒大小、形状、紧密程度和织物的种类、孔径以及厚度等因素有关，也受试验时正压力大小的影响。根据国内外有关试验结果，细粒土（如细砂、砂壤土等，其土颗粒粒径小于织物孔隙），以及疏松的中等颗粒的土（如松砂等），它们与织物之间的摩擦角接近于土体本身的摩擦角。对于粗颗粒土（如粗砂、砾石，其颗粒一般大于织物的孔隙），以及密实的中细砂等，与织物间的摩擦角小于土的内摩擦角，且土与针刺无纺织物之间的内摩擦角较大，土与土工膜及有纺织物或热粘无纺织物之间的摩擦角较小。

（二）拉拔摩擦试验

土工合成材料埋在土内，受到沿其平面方向的拉力时，将在拉力方向上引起应力和变形。由于有法向应力作用，受拉时上、下界面上将引起摩擦阻力。该阻力沿拉力方向不是均匀分布的，而随各点的应变不同而不同。材料被拔出的瞬时，可认为上、下界面的摩阻力均匀分布，并与拉力平衡，该值即为界面的摩擦强度。其计算公式为

$$\tau = \frac{T_d}{2 \cdot L \cdot B} \tag{4-4}$$

式中：τ—— 界面摩擦阻力强度（Pa，kPa）；

T_d——织物试样被拔出时的瞬间拉力（N，kN）；

L、B——织物试样埋在土内部分的长度、宽度（m）。

试验应在 4 种不同法向压力 p 作用下进行，分别测出 τ 值，绘制 τ—p 曲线。从而根据直剪试验中处理计算方法，求出粘结力 C_a 和摩擦角 δ 或似摩擦系数 f^*。拉拔试验箱示意图见图 4-5。

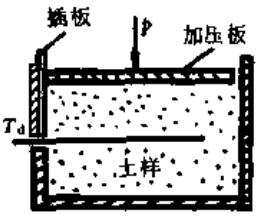


图 4-5 拉拔试验箱示意图

试验方法也有应变控制与应力控制之分。土工合成材料拉拔试验多采用应变控制。

直剪摩擦试验与拉拔摩擦试验的机理不同，结果常存在一定差异。哪种结果更为合理，难以简单评价。两种试验的强度发挥和主要影响因素不同。如果能预估实际工程填土和织物可能出现的相对位移情况，则单面的相对位移，直剪摩擦试验较能反映实际；双面均与土发生相对位移，则拉拔试验可能更为合适。对刚度较小的土工合成材料，直剪试验较符合实际情况；对刚度较大的材料则拉拔试验更适宜。

四、水力学特性

由于土工织物、细孔土工网等土工合成材料可以使水及空气自由地通过，并能有效地截留和控制土颗粒的流失，因此被广泛地用作排水和过滤材料。为此必须研究其水力学特性。主要包括两方面：一是透水与导水能力，二是阻止颗粒流失的能力。这些特性包括土工合成材料的孔隙率、孔径大小与分布情况、渗透特性等。现将这些特性简述如下。

土工合成材料的孔隙率是指其孔隙体积与总体积的比值，以 n（%）表示。它的确定不需要直接进行试验，而是通过计算求得。可按以下公式计算

$$n = \left(1 - \frac{m}{\rho \cdot \delta}\right) \times 100\% \tag{4-5}$$

式中：m——单位面积质量（g/m^2）；

ρ——原材料密度（g/m^3）；

δ——织物厚度（m）

土工合成材料的孔径反映材料的透水性能与保持土颗粒的能力，是一个重要的特征指标。孔径的符号以 O 表示，单位为 mm，并用下标表示织物孔径的分布情况，例如 O_{95} 表示材料中 95% 的孔径低于该值。孔径大小的分布曲线类似于土的颗粒级配曲线。现在表示土工合成材料特征孔径的方法有：有效孔径 O_e 及等效孔径 EOS。目前普遍采用 EOS，其含义相当于材料的表观最大孔径，也就是土颗粒能通过土工合成材料的最大粒径。不同的标准对 EOS 的规定不同，目前我国多取 O_{95}。目前孔径的测量方法有直接法和间接法两大类。直接法包括显微镜法和投影放大测读法。间接法有干筛法、湿筛法、水动力法、水银压入法、吸引法和渗透法等。

土工织物的渗透特性是其重要水力学特性之一。在过滤标准及其它有关水力学设计中，是一项不可缺少的重要指标。根据工程的需要，常要确定垂直于织物平面的渗透特性和平行于织物平面的渗透特性。垂直于织物平面的渗透特性，主要用垂直渗透系数 k_n 表示，该系数是

渗流的水力梯度等于1时的渗流流速，一般服从达西定律。土工织物的渗透系数约为8×10^{-4}～5×10^{-1}cm/s，其中无纺织物的渗透系数为4×10^{-3}～5×10^{-1}cm/s。沿织物平面的渗透系数$k_{\perp}$定义为水力坡降等于1时的渗透流速。无纺织物的k_t值大约在10^{-3}～10^{1}cm/s，一般比垂直于织物平面的渗透系数k_n大。影响土工织物渗透的因素十分复杂，主要有：试样面积的大小、织物本身的性质、织物的结构类型及孔隙分布、织物平面上的法向应力、水位差、水温、水中气泡含量和测试仪器的性能等。

使用土工膜的目的在于防渗。它可以阻挡水、水汽、气体及有害物质（例如甲醇、丙酮和二甲苯等）的渗透。由于使用条件不同，引起渗流的原因不同，主要因素有压力和温度。土工膜在水压力作用下产生渗流的原因是由于制造时的不均匀性和缺陷等因素所造成的。有些细微的通道，则是在一定的水压力下被水冲破而形成的。温度变化引起水体积变化。土工膜的渗透系数愈小，温度对试验结果的影响愈大。

土工织物用作滤层时，水从被保护土中流过织物，在流动中使土颗粒集聚在织物表面的孔口上，堵塞水流通道的进口，或是细颗粒沉积在孔隙内部，逐渐减小通道的有效过水面积。前者称为堵塞，后者称为淤堵。堵塞一般发生在渗流开始阶段，而淤堵随时间增长而加重。目前判断织物滤层淤堵，通常是通过观察通过织物的流量减小以及进入织物的土颗粒增多的现象来评估，还不能给出淤堵程度的允许值，只能通过被保护土与织物滤层的长期工作试验，观测渗透流量的变化与稳定情况来评估。

五、耐　久　性

土工合成材料的耐久性包括很多方面，主要是指对紫外线辐射、温度变化、化学与生物侵蚀、干湿变化、冻融变化和机械磨损等外界因素变化的抵御能力。材料的耐久性主要与聚合物的类型及添加剂的性质有关。

土工合成材料的老化现象主要是因为高分子聚合物具有链节结构，受外界因素的影响，发生降解反应或交联反应的结果。使材料老化的各种因素中，阳光辐射起着最重要的作用。紫外线具有很大的能量，能够切断许多聚合物的分子链，或者引发光氧化反应。其试验方法主要有自然老化和人工老化两大类试验。近几年采用了一系列措施以增加聚合物的抗老化能力，并取得了很好的效果。添加防老化剂，方法简便，效果显著，是当前防老化的主要途径。土工合成材料在有覆盖的情况下（或埋在土中），老化速度缓慢。

聚合物对化学腐蚀一般具有较高的抵抗能力，但某些特殊的化学药剂或废品，对聚合物有腐蚀作用。因此利用土工合成材料（如土工膜）作污水或废物存储池的防渗材料时，对其化学稳定性要认真对待。

土工合成材料在铺设过程中易受损伤，且不易被发现。国外试验研究发现，埋在土中的织物老化主要是由于机械损伤引起的，铺设造成的孔洞是使材料强度降低的主要因素。孔洞数愈多，原始强度降低得愈多。

在高温条件下，合成材料将发生熔融现象。有时温度虽未达到融点，但较高时，聚合物分子结构也可能发生变化，影响材料的弹性模量和强度。有些聚合物在特别低的温度下，也使柔性降低、质地变脆，影响其力学特性，给施工及接缝造成困难。

此外，干湿度和冻融变化可能使一部分空气或冰屑存在织物内部，影响其渗透特性。

第三节　土工合成材料的工程应用

一、土工合成材料的功能及适用范围

土工合成材料的功能是多方面的。综合起来，可以概括为六种功能：过滤作用、排水作用、隔离作用、加筋作用、防渗作用和防护作用[27]。

（一）过滤作用

把土工织物置于土体表面或相邻土层之间，可以有效地阻止土颗粒通过，从而防止由于土颗粒的过量流失而造成土体的破坏。同时允许土中的水或气体通过织物自由排出，以免由于孔隙水压力的升高而造成土体的失稳等不利后果。

土工织物可适用于：土石坝粘土心墙或粘土斜墙的滤层，土石坝或堤坝内的各种排水体的滤层，储灰坝或尾矿坝的初期坝上游坝面的滤层，堤、坝、河、渠及海岸块石或混凝土护坡的滤层，水闸下游护坡下部的滤层，挡土墙回填土中排水系统的滤层，排水暗道周边或碎石排水暗沟周边的滤层，水利工程中水井、减压井或测压管的滤层等。

（二）排水作用

有些土工合成材料可以在土体中形成排水通道，把土中的水分汇集起来，沿着材料的平面排出体外。较厚的针刺型无纺织物和某些具有较多孔隙的复合型土工合成材料都可以起排水作用。

它们可适用于：土坝内垂直或水平排水，土坝或土堤中的防渗土工膜后面或混凝土护面下部的排水，埋入土体中消散孔隙水压力，软基处理中垂直排水，挡土墙后面的排水，各种建筑物后面的排水，排除隧洞周边渗水、减轻周边所承受的外水压力，人工填土地基或运动场地基的排水等。

（三）隔离作用

有些土工合成材料能够把两种不同粒径的土、砂、石料，或把土、砂、石料与地基或其他建筑物隔离开来，以免相互混杂，失去各种材料和结构的完整性，或发生土粒流失现象。土工织物和土工膜都可以起隔离作用。可用于：道路基层与路基之间或路基与地基之间的隔离层，在土石混合坝中隔离不同的筑坝材料，用做坝体与地基之间的隔离体，堆场与地基间的隔离层等。

（四）加筋作用

很多土工合成材料埋在土体中，可以分布土体的应力，增加土体的模量，传递拉应力，限制土体侧向位移；还增加土体和其它材料之间的摩阻力，提高土体及有关建筑物的稳定性。土工织物、土工格栅、土工网及一些特种或复合型的土工合成材料，都具有加筋作用。可用于：加强软弱地基，加强边坡稳定性，用做挡土墙回填土中的加筋，或锚固挡土墙的面板，修筑包裹式挡土墙或桥台，加固柔性路面、防止反射裂缝的发展等。

（五）防渗作用

土工膜和复合型土工合成材料，可以防止液体的渗漏、气体的挥发，保护环境或建筑物的安全。可用于：土石坝和库区的防渗，渠道防渗，隧道和涵管周围防渗，防止各类大型液体容器或水池的渗漏和蒸发，屋顶防漏，用于修筑施工围堰等。

（六）防护作用

多种土工合成材料对土体或水面可起防护作用。主要用于：防止河岸或海岸被冲刷，防止垃圾、废料或废液污染地下水或散发臭味，防止水面蒸发或空气中灰尘污染水面，防止土体冻害等。

二、土工合成材料的工程应用

（一）防渗

粘性土是土木工程中常用的、可大范围采用的防渗材料，但工程量大，工程质量不易保证，易出裂缝和边界连接已渗漏等缺点。而土工膜却是一种轻便的、便于施工、造价低廉、性能可靠的防渗材料。

1. 土工膜防渗层的结构

土工膜防渗结构包括土工膜、保护层和支持层等。

土工膜是防渗结构的主体。选择土工模的关键在于能否满足工程的要求。良好的均匀性和防渗性能是选择土工膜首先应考虑的因素。一般塑料制品，尤其是热压塑料制品，质地比较均一，渗透系数比合成橡胶小，工程中选用得较多。涂塑的制品均匀性差，选用时需慎重。橡胶制品有涂刷和压制的两种，后者较前者好。其次，也应注重选择合理的土工膜厚度，因其直接影响工程质量。减少渗漏，避免施工破损、水压击穿、地基变形、撕裂土工膜等都要求土工膜具有一定的厚度。根据水压大小用理论计算的土工膜厚度一般较薄，实用时需留有较大的安全系数。常用的土工膜厚度一般不小于0.25mm。加筋和复合土工膜可明显地增大抗刺破和耐水压能力，重要工程可优先选用。水头较小的工程，可选用较薄的土工膜以降低造价。此外，为避免防渗工程的滑动失稳，还应加大土工膜与保护层或支持层的摩擦力，为此可在制造时加粗土工膜表面。膜外面为针刺无纺布的复合土工膜，不仅可以加大其表面粗度，而且可作为排水层和垫层，但造价较高，宜于重要建筑物选用。

土工膜上的保护层是为了防御波浪的淘刷、风沙的吹蚀、人畜的破坏、冰冻的作用、紫外线的辐射、风力的掀动以及膜下水压力的顶托而浮起等。保护层的结构、层次和材料与工程的重要性、工程规模、使用期（永久性或临时性）、使用条件等有关，宜根据工程的具体情况，经过周密的研究，提出合理的设计方案。

由于土工膜是柔性的，必须用支持层来支承。支持层的作用是使土工膜受力均匀，免受局部集中应力的损坏。支持层与其下卧层的具体条件有密切的关系，同时又与工程的类型及使用条件有关。

2. 土工膜防渗层的类型

可分为单层土工膜防渗层、多层（包括双层）土工膜防渗层和在土工膜下铺一层渗透性较小土层的土工膜复合防渗层（见图4-6）。

单层土工膜防渗层为由上至下的保护层、土工膜和其下的支持层结构。对防渗要求高的情况，一道防渗漏防线不能满足，可采用二层或三层土工膜防渗层。为了减少第二层土工膜的水头，在第一层土工膜下埋设排水管，使透过第一层土工膜的水，通过排水管集中到集水井中，从而使透过第一层土工膜的水，在第二层土工膜上不能形成较大的水压力。绝大多数情况铺设两层土工膜已经足够了。

实践证明，土工膜因制造和施工因素造成的缺陷（漏水的孔洞或缝）往往成为渗漏的主要通道。若在此种土工膜下增加一个渗透性较小的土层，则可大大减少渗漏量。此时形成一种土工膜复合防渗层结构。

（二）隔离

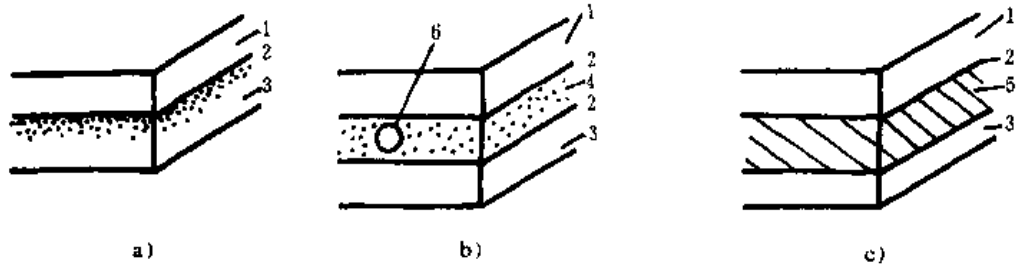


图 4-6　土工膜复合防渗层的类型

a）单层土工膜防渗层；b）双土工膜防渗层；c）土工膜复合防渗层

1-保护层；2-土工膜；3-支持层；4 透水层；5-低渗透性土；6-排水管

在如道路工程砂、砾石或碎石基层与上层一类存在两种材料接触的土建工程中，为了防止两种材料相互渗混，保证发挥结构预期作用，提供排水和防止地基承载力恶化等，常需在它们中间放置一层材料，把它们隔离开来。土工织物和土工膜就可以起到这种隔离作用。它们一般可以设在不同粒径之间，不使粗细颗粒混杂；放置在建筑物与软弱地基之间，同时起加筋作用；也可设在各种道路或场地与地基之间。

1. 设计要求

作为隔离层的土工织物和土工膜，必须满足两方面的要求：一方面它能够阻止较细的土粒侵入较粗的粒状材料中，并保持一定的渗透性；另一方面，它必须具备足够的强度，以承担由于荷重产生的各种应力或应变，亦即织物在任何情况下不得产生破裂现象。设计时，必须对材料的孔隙率、透水性、顶破强度、刺破强度、握持抗拉强度及其延伸率、撕裂强度等性能进行核算，以选择合适的材料。具体要求，由土建工程结构性质、尺寸大小、使用要求、荷载量、施工条件和土工合成材料本身的特性来确定。图 4-7 为土工织物的顶破和刺破情形。

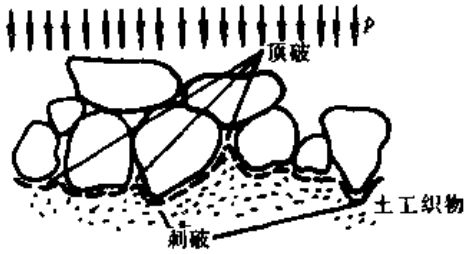


图 4-7　实际情况下的顶破与刺破示意

2. 施工技术要求

土工织物直接铺在路基表面或路槽表面，必须先清除路基表面和路槽中有可能损坏织物的凸出物等，然后将土工织物展开铺平，尽可能无折皱地布置在路基上或路槽内。若需在一个较长的距离内整块展开土工织物，则应将其固定，以防止四周被吹起。在承载力低的地区铺设材料时横向亦需固定。图 4-8 为道路工程中土工织物的摊铺方式。

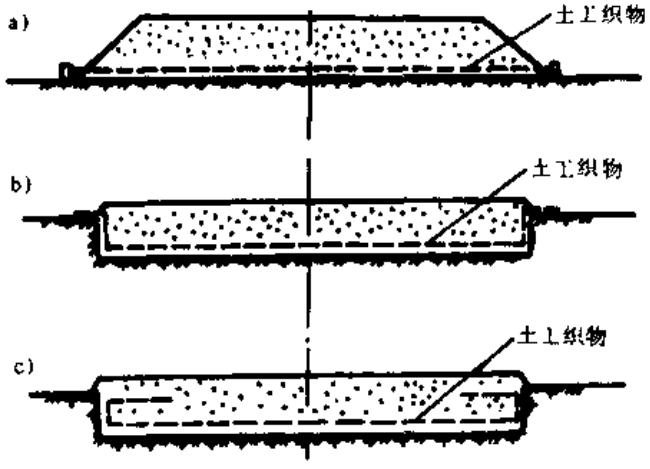


图 4-8　道路工程中土工织物摊铺方式

织物与织物的连接一般有搭接和缝接两种方法。

为了保证在施工中土工合成材料能保持其完整性，需针对路基状态与施工机械、路堤填料与施工机械提出相应的施工要求。

（三）加筋

由于土体只具有一定的抗压和抗剪强度，而它们的抗拉强度却很低，在土内掺入或铺设适当的加筋材料（如土工织物和土工格栅），可以不同程度地改善土体的强度与变形性态。

1. 土工合成材料加筋材料的类型

土工织物，包括编织型土工织物和非织型土工织物。前者应用普遍，后者变形量大，仅用于应力水平较低的加筋工程中。

筋材制品，包括土工格栅、土工网、土工垫、土工格室和条带筋材等。这类制品一般具有较高的抗拉强度和较低的延伸率，它们和周围土的相互作用好，摩阻力、咬合力高。

加筋复合制品，例如用聚酯、玻璃纤维或钢筋作为加筋料制成的复合土工织物，以条带、绳索、连杆或板条等形式与土工织物复合。

土工合成纤维，即将合成材料特制成的网片拌入土内，或直接在施工现场喷射纤维丝掺入土中，形成所谓的网片土或纤维土。

2. 土工合成材料在加筋工程中的应用

土工合成材料加筋技术在水利、铁路、公路、港口和建筑工程中得到大量应用，归纳起来，大致可分为支挡结构、陡坡、软弱地基和路面结构加筋四个方面。

1）支挡结构：包括挡墙、桥台及岸边陡壁等。在这类应用中，是将一些形式的加筋材埋在填土中，依靠它们来平衡土压力。实验结果表明，在土体中加铺土工格栅，能有效地提高土体的抗压强度，改变其破坏模式[40][41]。

由于这类结构是柔性的，较之传统的如混凝土等刚性结构能更好地适应地基变形，所以在不良地基处采用尤能显示其优越性。一般它们的工程造价也较低廉。土工合成材料建造的挡土结构常见的有条带式和包裹式两种。人们曾成功地利用加筋土技术处理道路工程界一直未能解决好的桥头跳车问题[42~44]。一种方法是在石砌或混凝土刚性桥台台背采用加筋土填筑技术，利用土工格栅等筋材的抗拔作用改变土体中的受力状态，减少路基顶面的沉降及沉降差，从而减小桥头错台，达到避免桥头跳车的目的。另一种方法是将刚性桥台改为加筋土桥台，使得桥台与台背填料支承性能基本相同，从而在外部荷载和自重作用下二者的受力变形协调一致，防止错台的产生。土工合成材料包裹式加筋土桥台如图 4-9 所示。相邻两层土工格栅间距可在 40～80cm 之间选择，一般在桥台高度范围内采用上下间距小、中间间距大的布置方法，具体还应考虑施工的便易性；填料可参考有关加筋土设计规范要求。

2）陡坡工程：用土工合成材料处理陡坡工程，对于天然坡，可以让出更多空间供工程建设；对于人工坡，一方面可减少填土方量，同时可以节约占地（图 4-10）。

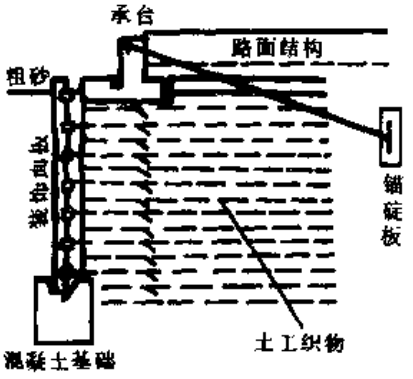


图 4-9　土工合成材料包裹式加筋土桥台

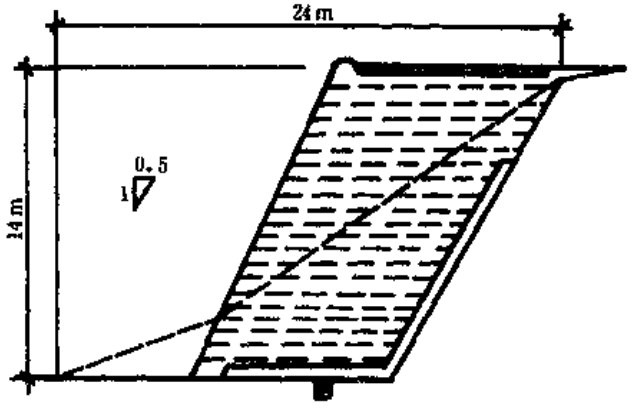


图 4-10　加筋陡坡

在加筋陡坡的稳定性分析时，常常采用极限平衡方法。破裂面有曲线形和折线形等形状。在设计时牵涉到加筋层间距、加筋长度和筋材、土样自身性质等。

3）软弱地基：利用土工合成材料加筋软弱地基，一般是在堤身底部铺放单层或多层高模量的土工合成材料，限制基土的侧位移。这样的加筋常常是为了提高堤坝的抗滑稳定性；增加堤坝的填筑高度；减小施工期填土的大量下沉，节约土方量；使堤坝下沉趋于均匀，防止堤面开裂[49~53]（图 4-11）。

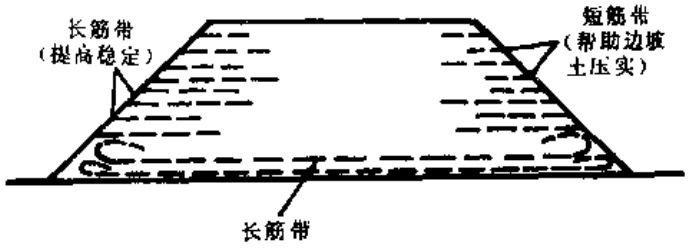


图 4-11　路堤加筋

经过试验证明，采用土工格网或土工格栅加填料形成的夹层结构，能较好地解决地基土压实、改变软基的破坏形式、提高软基承载力的问题。

在利用碎石桩处理湿软地基时，将会遇到碎石桩端头断裂及淤堵问题，使碎石桩减弱甚至丧失排水作用。可以利用土工格栅加筋碎石桩，以解决这两种问题[53~55]。土工格栅在碎石桩中加筋方式有平铺式和包裹式两种。前者利用格栅层间剪切约束作用，保证碎石桩的碎石材料不发生剪切破坏或鼓出破坏[54]；后者利用包裹着的格栅使碎石材料形成一个整体，研究表明，合适的格栅可使碎石桩承载力提高 10 倍以上[55]。若在碎石桩周围包裹一层起过滤作用的细孔土工网，则可避免碎石桩淤堵现象[53]。

4）路面结构：将土工布、土工格栅等材料用于路面结构，可达到减薄基层或面层、防止反射裂缝和减少车辙等目的。

由于加筋材料的扩散荷载作用，将筋材用于结构层内部或结构层之间，可以减小结构层底部弯拉应力及路表弯沉，相应地提高路面结构层整体强度和刚度，延缓路面的使用寿命，这相当于起到了增厚结构层的作用[57]。

在面层与基层之间、面层内合适位置或罩面层底部铺设土工布或土工格栅，利用筋材的张拉作用、筋材与结构层间的摩擦作用和裂缝在沥青面层中扩展时筋材的桥联作用，可以减弱下部裂缝尖端应力集中程度，降低裂缝向上扩展的速度，甚至改变其扩展的方向，从而达到抑制反射裂缝形成的目的，延长路面的使用寿命，这已经在工程中得到成功的应用[58~61]。应用加筋技术处理沥青路面开裂，可以推迟疲劳裂缝发生的时间 1～9 倍。关于筋材在路面抗裂中的应用机理，对于沥青路面结构和沥青罩面结构，它们有所差异，其机理和设计方法尚需做进一步的研究。

应用土工格栅防治沥青路面车辙，由于所用材料的力学性质与沥青混合料相协调，土工格栅的抗拉强度得以发挥。在少量增加沥青路面结构层模型的同时，大幅度地提高了沥青路面结构层的韧性，有效地改善了其力学性能。应用土工格栅，可以减少 50%的车辙。

（四）过滤

对用于过滤的土工合成材料，要求满足两方面的要求，即要求能挡土，同时要求保持水流的畅通。应将过滤材料设在水流有可能使土体产生严重渗透变形的地方。

对于无粘性土，当渗流经过土层进入土工织物内时，在渗透力的作用下，有可能把紧靠着土工织物而粒径又较小的土粒挟带入土工织物，这种情况逐步向远离土工织物的方向发展，逐渐形成一定厚度的由较粗土粒形成的架空层，这一层的颗粒较粗，渗透系数较大，但它不能阻挡细土粒的移动。在土工织物的过滤作用充分发挥时，在架空层的上游一侧会形成一层

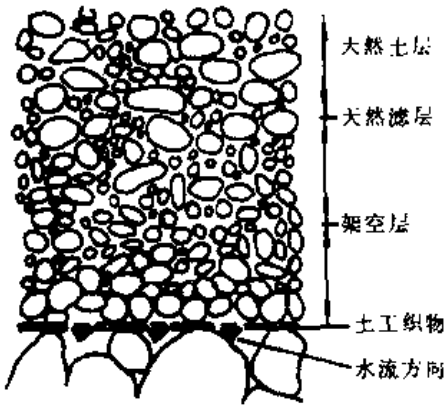


图 4-12　天然滤层

天然滤层。天然滤层的特点是该层的细粒土的含量比架空层多一些，透水性相对地低一些，从而阻挡了相邻的天然土层的细粒土的移动，因此起到了挡土作用（图 4-12）。在这一过程中，土工织物仅仅起一个引发天然滤层的作用。天然滤层的形成，与土层的级配和结构情况、水流情况和荷载性质等有关。

对于不是分散性、塑性较大的粘性土、土工织物将阻挡其中的闭粒，从而起到过滤的作用。而对塑性低的粉粒含量较多的粘性土，不易形成天然滤层，这时土工织物如同传统的粒料滤层一样，依靠本身有足够小的孔径来阻挡土料的移动，起到良好的过滤作用。

在利用土工织物作过滤材料使用时，要注意其长期使用中产生淤堵的问题。

（五）排水

用土工合成材料作排水材料使用，其目的是降低和控制土中水位，加速减少土中孔隙水的超静水压力和控制水流渗出位置等，从而提高土体的稳定性。此时应注意土工合成材料的渗透性。

很多土工织物的渗透能力很强，因为其孔隙率很大，同时土工织物的孔径可以达到较大的数值。土工织物的渗透性与其孔隙的大小和分布情况有关，它不是随时间的延续而固定不变的。除了由于试验条件不够理想而引起织物渗透性能波动外，更主要的是土工织物与土体相接触，在渗流时必然会产生淤堵现象，引起土工织物渗透能力的下降。

（六）防护

防护所涉及的内容相当广泛，凡是为了消除或减轻自然现象、环境作用或人类活动等因素造成的危害所采取的各项措施均在防护之列。

在防水流冲蚀的工程中，土工合成材料在土与水流之间形成隔离层，避免水流直接冲刷，消减其能量；既能渗水，又不让土粒被水流带走；或是直接封堵水流通道，消除冲蚀动力等。用土工合成材料制成的防冲蚀结构或部件常见的有：土工合成材料软件排，土工合成材料沉枕，土工合成材料石笼，土工合成材料长管袋，织物模带，土工网、席垫，以土工合成材料建成的丁坝、顺坝和锁坝等（图 4-13）。

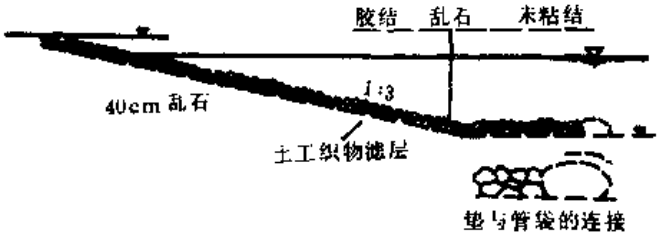


图 4-13　排体端部柔性结构

用土工合成材料处理我国季节性冻区的挡土墙，保温防冻是最有效的方法之一。如聚苯乙烯硬质泡沫板是一种良好的保温材料，导热系数低、基本上不吸水，埋在土中能改变负气温和土体间的热交换条件，减小冻深和改变填土中的温度场，从而减轻或根除冻胀（图 4-14）。

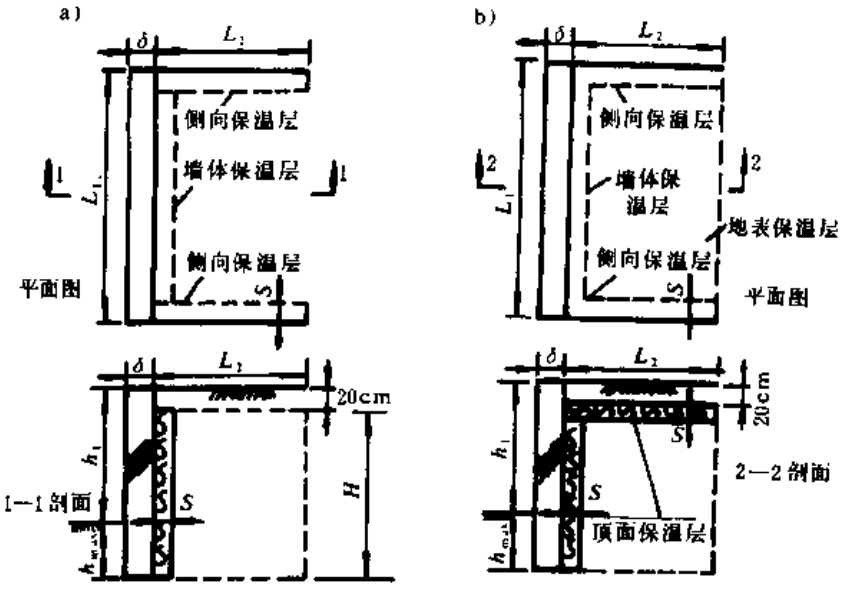


图 4-14　保温材料布置范围

a）单向保温 b）双向保温

第五章　其它道路复合材料

随着科学技术的不断发展，在道路工程中，除钢纤维混凝土、土工合成材料外，还有一些复合材料也开始用于工程实践中。本章所述的即为用于道路工程中的另外几种复合材料。

第一节　水泥沥青混凝土[63]、[64]

沥青类路面由于可降低油耗、行车舒适、提高车速等优点，已广泛应用于城市道路、高速公路上，但因沥青所具有的粘弹塑性等特殊性能，致使沥青路面的强度和流变性质均受温度影响。高温时，沥青混凝土会因粘度降低，与集料颗粒间凝聚力减弱，导致沥青路面易出现波浪、拥包之类的剪切变形。而在低温时，又因沥青粘度的提高，变形能力大为降低，表现出脆性，导致沥青路面因温缩而易开裂。加入改性剂制得改性沥青是解决这一矛盾的一种有效方法。实践证明，在普通沥青混凝土中加入水泥作为第二结合料，形成水泥沥青混凝土复合材料也是一种有效方法。用这种材料修筑的沥青面层称为水泥沥青混凝土面层或称半刚性沥青面层。这种新型复合材料修筑的路面主要有以下特点：

1. 具有与水泥混凝土路面相似的刚性，也具有柔性；
2. 与沥青路面相比，有较高的耐高温流动性；
3. 路表面有较强的耐磨耗性，不易起尘；
4. 胀缩量很小，不需设伸缩缝。

水泥沥青混凝土作为路面材料，最早应用于1954年建造的法国涅雅克（cognac）航空港喷气式飞机跑道上，作为耐热用的道面。1962年日本在高速公路等工程上加以应用，并制定了公司的设计标准加以推广使用。现在日本每年都有20多万平方米的施工面积。70年代初，英国、原联邦德国、法国和原苏联等国家，也从事于这方面的研究，提供了有关这种材料的力学性能和路面结构设计计算方法的研究论文，修筑了试验路，证实该种材料可提高沥青混合料的高温稳定性及低温抗裂性，延长了路面的使用寿命，节约投资10%～12%。

湖南大学在60年代初，同济大学在80年代以及湖北宜昌公路段和长沙交通学院在近几年都曾做过有关水泥沥青混凝土路用性能、拌和方法等试验研究。

水泥沥青混凝土所用原材料由沥青、水泥、水、集料及外加剂等主要材料组成，其特性与组成材料有关。

一、原材料选择

水泥沥青混凝土中所用水泥、沥青、集料和水的选择可参照普通水泥混凝土和沥青混凝土，用于水泥沥青混凝土中的外加剂主要有改变性能的外加剂，如减水剂、缓凝剂；使沥青乳化的乳化剂和稳定剂；改变强度和耐久性能的外加剂，如高分子化合物；改善水泥和沥青结合的外加剂，如表面活性剂等。

二、施工工艺

水泥沥青混凝土的施工方法主要有热拌和法、灌浆法和冷拌和法。

1. 热拌和法：在热拌沥青混合料中，分别掺加单独拌制好的某剂量的特种水泥浆或水泥砂浆，在控制的温度下（110℃左右）迅速进行第二次拌和，然后摊铺压实。

2. 灌浆法：在已压实冷却的开级配沥青混凝土中灌注一定数量的水泥浆，再用小型振动压路机碾压，确保浆料的渗透。

3. 冷拌和法：以乳化沥青、水泥、水、集料在常温下拌和、摊铺和压实。

三、水泥沥青混凝土的技术性能

（一）热拌和法制备的水泥沥青混凝土的性能

1. 水泥沥青混凝土中，主体部分的沥青混合料，同样要求有密实的矿质骨架和最佳的沥青用量。所用水泥浆其水灰比为0.6～0.8，灰砂比为1∶1或1∶2、2∶1。水泥砂浆中宜加适量外加剂。

2. 水泥沥青混凝土的性能

与普通沥青混合料性能相比，水泥沥青混凝土有如下特点：

1）高温稳定性能好　据湖北宜昌公路段试验资料：3天龄期的稳定度可提高1.7～2.5倍，7天龄期可提高3倍，28天龄期可提高3.5倍，残留稳定度亦可提高1～2倍。另外，温稳系数（温稳系数为20℃与50℃时沥青混凝土抗压强度的比值，其值越小，沥青混凝土热稳定性越好，反之则相反。）亦有所降低。据同济大学资料，其凝聚力C及内摩阻角ϕ均有所提高。

2）低温抗裂性好　据同济大学试验资料，水泥沥青混凝土收缩应变或收缩系数均有所减小，如平均收缩系数减小17%～33%；在相同温度下（0℃、－7.5℃及－15℃），水泥沥青混凝土拉伸蠕变劲度值减小，相应降低了路面的温度应力，所以低温抗裂性得以提高。

3）耐久性好　据同济大学资料，在试验温度为20℃、单向反复弯拉每分钟100个循环的疲劳试验表明，水泥沥青混凝土始裂时及断裂时的反复弯拉次数增大。当试件发生裂缝后，尚能继续弯拉的次数是始裂时次数的2.3倍，而普通沥青混合料，仅为1.2倍次数时，试件就发生断裂。

3. 影响水泥沥青混凝土性能的主要因素

1）沥青剂量　当水泥砂浆用量一定时，与普通沥青混合料相比，满足相同矿料的沥青混合料的稳定度、流值、空隙率要求时，沥青用量范围有所增大，但沥青用量不在最佳值时，对掺4%～12%的特种水泥砂浆的水泥沥青混凝土的抗弯拉强度的提高不利。因此，宜选择最佳沥青用量。

2）水泥砂浆掺量　随水泥砂浆掺量提高，其马歇尔稳定度、残留稳定度、视劲度、抗压强度均有所提高，温度敏感性减小。加入特种水泥砂浆的水泥沥青混凝土随水泥砂浆掺量的增加，流值略有减小。而水泥沥青混凝土在砂浆掺量的某一最佳范围时可获得最小空隙率。

3）龄期　随龄期增长各种强度逐渐提高，劲度模量也逐渐增大，直至某一稳定值。

（二）灌浆法制备的水泥沥青混凝土的性能

1. 水泥沥青混凝土的配合组成设计

用灌浆法制备的水泥沥青混凝土，沥青混合料的空隙率宜为20%～23%，油石化一般为3%～5%，参考级配范围见表5-1。稳定度不小于3500N，流值符合规范要求。

矿料级配范围　　表5-1

筛孔尺寸（mm）	25	20	13	5	2.5	0.6	0.074
通过百分率（%）	100	95～100	50～70	5～30	3～25	2～12	0～5
		100	95～100	5～30	3～25	2～12	0～5

灌浆法所用水泥浆基本要求：水泥浆7天龄期的抗折强度应大于3.0MPa，水灰比可取0.6～0.8。为提高路面的耐水性与耐磨耗性，可加入树脂类或橡胶乳液，也可加入适量粉煤灰代替部分水泥。

2. 水泥沥青混凝土的性能及影响因素

1）高温稳定性

在相同的主体沥青混凝土中、采用相同的灌浆量，随着水灰比的增大，稳定度近似于直线下降，但流值变化不大。

相同水灰比，随着灌浆量的增大，空隙率逐渐减小，且可能趋于一个定值。

在水泥浆中，掺加适量的聚合物和粉煤灰，可增大密实度，并使稳定度提高。

马歇尔试验表明，高温稳定性显著提高。

2）低温抗裂性——劈裂试验

15℃时的劈裂试验结果表明，掺有聚合物的水泥沥青混凝土劈裂强度最大。掺粉煤灰劈裂强度最小，且劈裂劲度最大。而用拌和法制备的水泥沥青混凝土劈裂强度居中，劲度模量最小。

（三）冷拌法制备的水泥沥青砂浆性能[65]

目前，冷拌法制备的水泥沥青砂浆主要用于路面的表面处治、路面基层材料和防水工程中的找平、打底及防水层。其参考配比和主要性能见表5-2。

水泥乳化沥青砂浆的成分和性能　　表5-2

成分和性能	不加水泥		加入水泥	
	A—1	A—2	A—3	A—4
砂浆成分（质量%）				
石灰沥青膏	18.0	24.0	12.0	18.8
石灰石粉	8.2	7.6	无	无
硅酸盐水泥	无	无	5.0	14.1
中等粒度砂	73.8	68.4	72.	60.9
水	无	无	10	6.2
干态容重（kg/cm³）	2.08	1.94	1.88	1.77
空隙率（%）	9.2	10.6	17.4	25.9
极限抗压强度（MPa）	34.7	20.7	15.4	20.0
热稳定系数	0.82	0.69	0.29	0.94
抗水性系数	0.5	0.62	0.84	0.81
6个月后的吸水率	5.63	6.76	10.4	11.35
6个月后的膨胀率（体积%）	1.76	1.07	0.0	0.00
抗冻性系数（25个循环）	1.0	1.29	1.77	1.73

四、水泥沥青混凝土的结构

在水泥沥青混凝土中，水泥水化时，水泥与沥青除物理吸附和化学吸附外，还可能发生化学反应，其结果是水泥水化产物与沥青膜交织在一起，并同矿料牢固结合而形成柔性空间网。此时，水泥砂浆充满空隙。水泥沥青混凝土正是利用水泥产物的凝结力及沥青的粘聚力、水泥与沥青的结合力，组成强固的复合力，使水泥沥青混凝土成为一种“密实—骨架”结构。从胶浆理论分析，它是一种多级空间双重网络结构系，在粗细微三级分散系中，以沥青胶浆的凝胶结构与水泥浆晶体及凝胶体的水泥石和可能的水泥沥青生成物形成多重网络结构体系。

第二节　聚合物水泥混凝土

聚合物水泥混凝土即普通水泥混凝土拌合物中加入聚合物形成的一种以聚合物与水泥共同作胶结料的复合材料。

将聚合物搅拌在混凝土中，聚合物在混凝土内形成膜状体，填充水泥水化产物和骨料之间的空隙，与水泥水化产物结成一体，起到增强与骨料粘结的作用，与普通混凝土相比，密实度和强度高，抗拉、抗弯强度增加显著，抗化学腐蚀性能好，收缩变形小等，因而作为地面、路面、桥面材料，具有强度高和较好的耐腐蚀性能，不易产生弯曲变形。随着高等级道路的发展，路面材料（水泥混凝土，沥青混凝土）中加入聚合物的量将愈来愈多，为便于理解、选择和使用这类新型复合材料，本节将作适当介绍。

一、聚合物概述

聚合物一般又称高分子化合物或者高聚物，是指许多大分子组成的物质。由于大分子的分子量高达$10^4\sim10^6$，所以称为高分子。实际上，高分子物质和低分子物质之间并无严格界限。然而工程上认为，高分子化合物具有较好的强度、塑性和弹性等机械性能，而低分子化合物没有这些性能。

（一）聚合物基本概念

1. 单体

聚合物的分子量虽很高，但化学组成并不复杂，它的每个分子都是由一种或几种较简单的低分子一个个连接起来而形成的。通常称这类能组成高分子化合物的低分子化合物为单体。例如，聚乙烯是由低分子乙烯（$CH_2=CH_2$）单体组成的。聚氯乙烯的单体为氯乙烯（$CH_2=CHCl$），丁苯橡胶的单体为丁二烯（$CH_2=CH-CH=CH_2$）和苯乙烯（$-CH=CH_2$）。

2. 链节

聚合物的分子很大，主要呈长链形，因此常称大分子链或分子链。大分子链极长，长度可达几千埃（Å）以上，而截面一般只有几埃，是由许许多多结构相同的基本单元重复连接构成的。组成大分子链的这种特定结构单元叫做链节。例如，聚乙烯大分子链的结构式为：

$$\cdots—CH_2—CH_2—\overset{\displaystyle|}{\underset{\displaystyle|}{}}—CH_2—CH_2—\overset{\displaystyle|}{\underset{\displaystyle|}{}}—CH_2—\cdots\ ,$$

可以简写为$\left[—CH_2—CH_2—\right]_n$。它是由许多$—CH_2—CH_2—$结构单元重复连接构成的。这个结构单元就是聚乙烯的链节。

3. 聚合度

聚合物中所含链节的数目 n 称为“聚合度”。所以，聚合物的分子量 M，是它的链节的分子量 m 和聚合度 n 的乘积，即 $M=n\times m$。聚合度反映了大分子链的长短和分子量的大小。

4. 多分散性

聚合物由大量大分子链组成，各个大分子链的链节数不相同，长短不一样，分子量不相等。聚合物中各个分子的分子量不相等的现象叫做分子量的多分散性。聚合物的多分散性决定了它的物理—机械性能的大分散度。

5. 平均分子量

由于多分散性，聚合物的分子量应该用平均分子量来表达。一般多采用重均分子量 $\overline{M}_w$，即按大分子的质量的分布求出的统计平均分子量。其表达式为：

$$\overline{M}_w=\sum W_pM_p=\frac{\sum n_pM_p^2}{\eta_p\overline{M}_p} \tag{5-1}$$

式中：W_p——分子量为 M_p 的分子所占的质量份数；

η_n——分子量为 M_p 的分子数；

M_p——聚合度为 p 的大分子的分子量。

（二）聚合物形成反应

聚合物的合成，就是把低分子化合物（单体）聚合起来形成高分子化合物的过程。其所进行的反应称为聚合反应。最常用的聚合反应有加成聚合反应（简称加聚反应）和缩合聚合反应（简称缩聚反应）两种。

1. 加聚反应

加聚反应指不饱和烯类单体通过加成聚合而成聚合物的反应。在反应过程中无小分子伴生。例如乙烯单体 $CH_2=CH_2$，在一定条件下（10.325kPa 和 200℃温度），它们的双键打开，由单键逐一串连成长长的大分子，进行加聚反应，生成聚乙烯：

$$nCH_2=CH_2\xrightarrow{\text{加聚}}\left[-CH_2-CH_2-\right]_n$$

目前，各国产量较大的聚合物品种，都是加聚反应的产品。

按加聚反应的单体的种类和高聚物本身的构型，加聚反应又可分为均聚反应和共聚反应：

1）均聚反应

只有一种单体进行的聚合反应称为均聚反应，其产物叫均聚物。其通式为：

$$nA\rightarrow[A]n\text{ 或 }-A-A-A-$$

如顺丁橡胶就是丁二烯单体在催化剂的作用下加聚（均聚）而成的均聚体。

$$\underset{\text{丁二烯}}{nCH_2=CH-CH=CH_2}\xrightarrow{\text{加聚}}\underset{\text{顺丁橡胶}}{\left[-CH_2-CH=CH-CH_2\right]_n}$$

2）共聚反应

为了改善聚合物的性能，由两种或两种以上的单体进行的聚合反应，称为共聚反应，其产物为共聚物。

共聚物的性能并非两种相应均聚物的简单加和，而是取决于两种单体的结构单元和两种单体的相对数量与排列方式。共聚物通过单体的改变，可以改进聚合物的性能，保持各单体的优越性能，创造新品种。同时，共聚反应扩大了使用单体的范围。有些单体本身不能进行均聚反应，但可共聚，因而扩大了制造聚合物的原料来源。两种单体共聚物依据单体链节不同的排列方式，可分成四种共聚物如图 5-1。

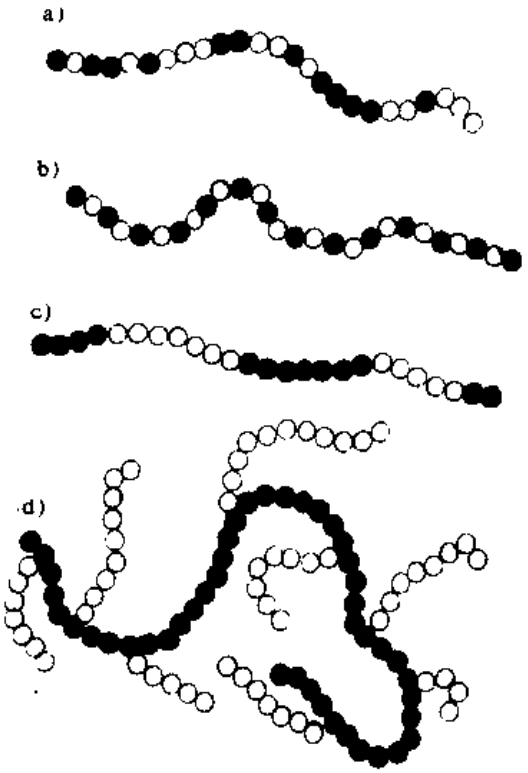


图 5-1　共聚物的分类

a）无规共聚物；b）交替共聚物；c）嵌段共聚物；d）接枝共聚物

（1）无规共聚物：共聚物中两种单体的结构单元排列顺序没有规律性，如

…—A—B—B—A—A—A—B—B—…

例如，氯乙烯与乙酸乙烯酯的共聚物。

（2）交替共聚物：共聚物中两种单体结构单元轮番交替地排列，如

…—A—B—A—B—A—B—A—B—…

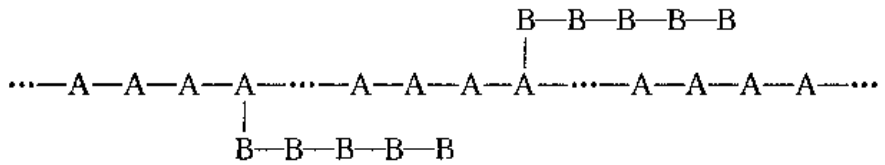
例如，顺丁烯二酸酐与 1，2—二苯乙烯共聚时形成交替共聚物。

（3）嵌段共聚物：共聚物中两种单体结构单元各自排列成段，二段均聚物的长短可以不同，但它们之间有化学键连接着，如

…—B—B—B—B—…—A—A—A—A—…—B—B—B—B—…

例如，改性沥青中常使用的 SBS 就是苯乙烯和丁二烯的嵌段共聚物。

（4）接枝共聚物：共聚物分子的主链由一种单体组成，支链由另一种单体组成，如



例如，天然橡胶接枝苯乙烯可提高其强度和耐磨性。

实际上，二元共聚物并非按完全单一的一种单体排列而成，而是以某一种排列为主的多种排列方式构成。

2. 缩聚反应

缩聚反应是指一种或多种单体相互混合而连接成聚合物，同时析出（缩去）某种低分子物质（如水、氨、醇、氯化氢等）的反应。缩聚反应的单体应该是具有两个或两个以上反应

基团的低分子化合物。反应基团一般为官能团（如 —OH、=CO、—COOH、—CHO、—NH_2、—NO_2 等），即能决定有机物分子化学特性的原子或原子团，也可以是离子、游离基（即带有未成对电子的原子或原子团）、络合基团等。根据缩聚反应参加反应的单体及生成产物的几何结构的不同可分为以下几种。

1）按参加反应的单体不同，缩聚反应可分为：

（1）均缩聚反应　同一种单体（含有两种或两种以上官能团）分子间进行的缩聚，称为均缩聚。其通式为

$$na—A—b \rightarrow —a\ (A)_n b + (n-1)\ ab$$

式中 $a—A—b$ 为低分子原料，a、b 为官能团，ab 为反应析出的低分子化合物，$a\ (A)_n b$ 为均缩聚物。

例如：氨基己酸经缩聚生成聚酰胺 6（即尼龙 6）。

（2）共缩聚反应　含有不同反应基团的两种或两种以上的单体所进行的缩聚反应称为共缩聚反应。其通式为：

$a—A—a + b—B—b + c—C—c \rightarrow a—A—B—C— +$ 小分子

或 $a—A—a + c—C—c \rightarrow a—A—C—c +$ 小分子

式中 $a—A—a$ 和 $b—B—b$ 为两种低分子原料，其余意义同前。

例如：己二胺和己二酸缩聚生成尼龙 66。

（3）混缩聚反应　两种不同单体分子间进行的缩聚反应，称为混缩聚。其通式为：

$$na—A—a + nb—B—b \rightarrow a—A—B—b + (2n-1)\ ab$$

式中符号意义同前。

例如：二元酸和二元醇经缩聚生成聚酯。

2）按产物的几何结构分类

按缩聚反应生成产物的几何结构不同，又可分为：

（1）线型缩聚　生成的产物的分子链为线状的，称为线型聚合物，例如涤纶和尼龙都是线型聚合物。

（2）体型（网状）缩聚　生成的产物的分子链交联成网状，或空间三维交联的，称为体型聚合物，例如酚醛树脂、醇酸树脂都是体型聚合物。

（三）聚合物分类和命名

1. 聚合物的分类

高分子材料的种类很多，数量很大，可以根据各种原则分类。但是最本质和最重要的是按照化学组成分类。按照大分子主链中的元素可以将聚合物分成四种。

1）碳链有机聚合物　这类聚合物的特点是大分子主链全部由碳原子组成：

$$—C—C—C—C— \text{或} —C=C—C—$$

2）杂链有机聚合物　这类聚合物的大分子主链中除碳原子外，还有氧、氮、硫、磷等原子：

$$—C—C—O—C—、—C—C—N—C—、—C—C—S—C—$$

杂原子存在，能大大地改变聚合物的性能。例如，氧能提高聚合物的弹性；磷和氯能提高耐火、耐热性；硫能增大不透气性等等。

3）元素有机聚合物　这类聚合物的主链不一定含有碳原子，而由无机元素硅、钛、铝、硼等原子和有机元素氧原子等构成，例如：

—O· Si···O—Si—O—

它的侧基一般为有机基团。有机基团使聚合物具有强度和弹性；无机原子则能提高耐热性。

4）无机聚合物　这类聚合物的大分子结构的特点是，主链和侧基均由无机元素或基团构成，例如无机耐火橡胶为：

$$\left[\begin{array}{c} Cl \\ | \\ P=N \\ | \\ Cl \end{array}\right]_n$$

它们的密度大，持久的耐热性高。石墨为碳链无机聚合物。

2. 聚合物的命名

聚合物的命名主要有以下四种方法：

1）习惯命名法　如按原料单体的名称，在其前加“聚”字或在其后附以“树脂”二字命名。

2）商品命名法　如尼龙、橡胶等。

3）系统命名法　按照国际理论化学与应用联合会命名法，是将聚合物的重复结构单元按照有机化合物系统命名法命名，最后再在前面冠以“聚”字。

4）英文缩写　由于聚合物名称较长，读写不便，所以常用英文名称的缩写表示，例如聚乙烯用 PE、聚丙烯用 PP、氯丁橡胶用 CR、丁苯橡胶用 SBR 等等。

（四）聚合物结构和物理力学状态

1. 聚合物聚集态结构的类型

聚集态结构指高聚物内部大分子之间的几何排列和堆砌方式。高聚物按其分子在空间排列的规则与否可分为：晶态和非晶态两类。但是高聚物中往往是晶态与非晶态并存，在晶态高聚物中也总有非晶区存在，如图 5-2 所示。

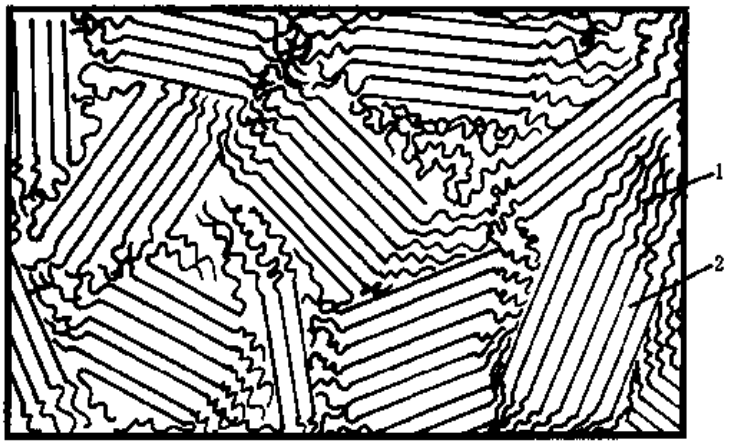


图 5-2　晶态-非晶态共聚物

1-玻璃态；2-微晶

2. 线型非晶相聚合物的力学特征

分子运动的特性主要决定于温度。温度变化时，聚合物的受力行为发生变化，呈现不同的力学状态，表现出分阶段的力学性能特点。图 5-3 为线型非晶相聚合物受恒定应力作用时变形量与温度的关系曲线，也叫热力学曲线。热力学曲线还可由不同温度下的抗拉强度、弹性模量或其他力学性能来确定。由图可知，在不同温度下有下列三种力学状态：

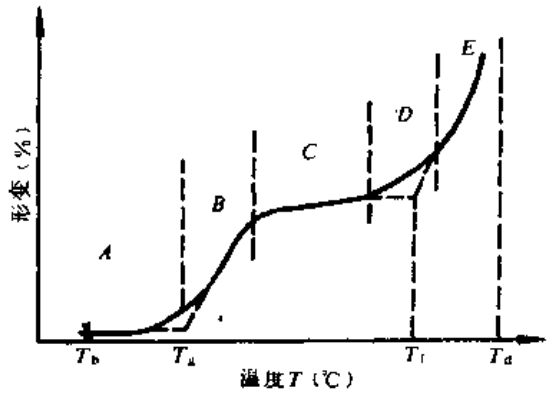


图 5-3　线型非晶相聚合物热力学曲线

1）玻璃态　当温度很低时，分子链间作用力很大，分子链和链段都不能运动，聚合物呈非晶相的固体称“玻璃态”。此时，只有比链段更小的结构部分（链节、侧基、原子等）在其平衡位置的附近作小范围的振动。受外力作用时，链段进行瞬时的微量伸缩和微小的键角变化。在玻璃态时，链段开始运动的温度称为“玻璃化转变温度”，简称“玻璃化温度”（T_g）。温度继续下降，当聚合物表现为不能拉伸或不能弯曲的脆性时的温度，称为“脆化温度”简称“脆点”（T_b）。在 T_g 以下，物体受力的变形符合于虎克定律，应变与应力呈线性关系，外力一经去除，变形立即消失，这是一种普弹性现象。

2）高弹态　随温度升高，当超过玻璃化温度，分子的动能增大，结构内空隙增多，聚合物的链段可以旋转，聚合物变得柔软，而且具有较大的弹性。当受到外力作用时，能产生很大的形变（可达1000%），外力卸除又会缓慢地恢复原状，聚合物的这种状态称为“高弹态”。

3）粘流态　随温度的继续升高，当温度达到“流动温度”（高弹态与粘流态间的转变温度 T_f）后，聚合物呈极粘的液体（粘流体）。此时分子可相互滑动，分子链和链段都可以移动。当受到外力作用时，分子间相互滑动产生形变，外力卸除后，形变不能恢复。这种形变为不可逆的，故称为“粘性流动形变”。

综上所述，常温下处于玻璃态的聚合物，通常作塑料或纤维使用。其使用范围在脆化温度（T_b）至玻璃化温度（T_g）之间，通常所指塑料耐热性，即指玻璃化温度的高低。在常温下处于高弹态的聚合物，宜作橡胶使用，其使用温度在玻璃化温度至粘流温度（T_f）之间，通常把最低使用温度（T_g）称为橡胶的耐寒性指标；而最高使用温度（T_f）称为橡胶的耐热性指标。

（五）聚合物的特性

1. 质量轻

一般密度在 1.0～2.0g/cm^3 之间，为钢的 1/8～1/4，为普通陶瓷的一半以下。

2. 高弹性、高塑性

聚合物的弹性变形量可达到 100%～1000%，弹性模量为 2～20MPa。

3. 粘弹性

某些聚合物，例如橡胶，特别是在低温和老化状态时，高弹性表现出强烈的时间依赖性。应变不仅决定于应力，而且决定于应力作用的速率。即应变不随作用力即时建立平衡，而有所滞后，表现出滞弹性。

4. 晶态与非晶态共存。

5. 同一种聚合物可加工为不同性质的材料。

6. 高的品质系数（极限强度与密度之比高）。

二、原材料选择

聚合物水泥混凝土主要由胶凝材料、骨料和水及有关助剂组成。

（一）聚合物

1. 分类

与水泥掺合使用的聚合物有天然和合成橡胶浆、热塑性及热固性树脂乳胶、水溶性聚合物等，可分为以下三类：

1）水溶性聚合物分散体乳胶类：包括橡胶胶乳、树脂乳液和混合分散体。

2）水溶性聚合物：包括纤维素衍生物—甲基纤维素（MC）、聚乙烯醇（PVA）、聚丙烯酸盐-聚丙烯酸钙和糠醇。

3）液体聚合物：包括不饱和聚酯和环氧树脂等。

聚合物的使用方法与外加剂一样，与水泥、骨料、水一起搅拌即可。一般情况下，其掺量约为水泥质量的5%～25%，不宜过多。水泥掺和用聚合物在出厂商品内未加消泡剂时，拌合时务必加适量的消泡剂。

2. 性能要求

为了取得改善混凝土性能的良好效果，必须选用与水泥水化适应性好的有机高分子材料。因此，对聚合物有如下几点要求：

1）对水泥凝结硬化和胶结性能无不良影响。

2）在水泥碱性介质中不被水解或破坏。

3）对钢筋无锈蚀作用。

3. 质量指标

水泥掺合物的质量要求见表5-3[25]

水泥中掺合聚合物的质量要求 表5-3

试验种类	试验项目	规定值
分散试验	外　观	应无粗颗粒、异物和凝固物
	总固体成分	35%以上，误差在±1.0以内
聚合物水泥砂浆试验	抗弯强度（MPa）	>4
	抗压强度（MPa）	>10
	粘结强度（MPa）	>1
	吸水率（%）	<15
	透水量（g）	<30
	长度变化率（%）	0—0.15

4. 常用品种

聚合物水泥混凝土中最初使用的有机材料是天然橡胶胶乳（NR），50年代初期开始研究使用合成树脂分散体，如合成橡胶胶乳。以后相继使用了树脂乳胶液如聚醋酸乙烯脂分散体、共聚物或三聚物（如丙酸乙烯脂/氯乙烯、苯乙烯/丙烯酸脂、苯乙烯/丁二脂）、丙烯酸脂类的聚合物等。它们的特点分别为：

1）聚醋酸乙烯脂（PVAC）在水泥中易于水解，在浸水情况下试件强度损失严重。

2）聚偏二氯乙烯（PVDC）具有与前者相似的作用，但较轻。

3）苯乙烯/丁二脂共聚物和丙酸乙烯表现出与碱性介质的作用很慢，在浸水情况下试件强度的增长只是中等，似乎不受浸水的影响。

4）丙烯酸脂类的聚合物在浸水条件下试件能保持其强度，表现出趋于水解的性能。经共聚反应的聚偏二氯乙烯也具有相同的效果。

（二）主要助剂

1. 稳定剂

由于水溶性聚合物分散体（乳胶类）树脂在生产过程中大多数用阴离子型乳化剂进行乳液聚合，为此当这些聚合物乳胶与水泥混合后，由于与水泥浆中溶出的大量多价钙离子作用会引起乳化液变质破乳，产生过早凝聚，使其不能在水泥中均匀分散，因此必须加入阻止这种变质现象的稳定剂。由于稳定剂的种类和掺量不同，其增强效果也会有明显的不同。稳定剂的加入，保证了聚合物与水泥混合均匀，并能有效地结合起来。常用的稳定剂有OP型乳化剂、均染剂102、农乳600等。

2. 抗水剂

有些聚合物如乳胶树脂或其乳化剂、稳定剂的耐水性较差，因此在使用时尚需加入抗水剂。

3. 促凝剂

当乳胶树脂等掺量较多时，会延缓聚合物水泥混凝土的凝结，要加入促凝剂，以促进水泥的凝结。

4. 消泡剂

将胶乳与水泥拌和时，由于乳液中的乳化剂和稳定剂等表面活性剂的影响，通常会产生许多小泡，如不把这些小泡消除，势必会增加砂浆的空隙率，使其强度下降，因此，必须添加适量的消泡剂。常用的消泡剂有以下四类。

1）醇类：有异丁烯醇、3-辛醇等。

2）脂肪酸脂类：有甘油硬脂酸异戊酯等。

3）磷酸脂类：有磷酸三丁脂等。

4）有机硅类：有二烷基聚硅氧烷等。

由于消泡剂的针对性很强，它们往往在一种体系中能消泡，而在另一体系中却有助泡作用，因此，应注意消泡剂的适应性。通常，可将消泡剂混合使用。其它材料的选择与普通混凝土基本相同。

三、配合比设计与施工工艺

（一）聚合物水泥混凝土配合比设计

1. 设计原则

与普通水泥混凝土和砂浆的配合比相比，聚合物水泥混凝土除应着重其和易性及抗压强度外，还必须考虑抗拉强度、抗弯强度、粘结性、水密性（防水性）、耐腐蚀性等一些性能。这些性质虽然和水灰比有关，但水灰比的影响没有象对普通水泥混凝土那样大，而这些性质与聚灰比（聚合物与水泥的质量比）的关系则更密切。所以，确定配合比时一般按和易性选择水灰比，而按使用要求确定聚灰比。

2. 聚合物水泥砂浆的参考配合比

聚合物水泥混凝土（砂浆）的配合比设计，除考虑聚灰比以外，其它可大致按水泥混凝土（砂浆）进行。通常聚合物水泥砂浆的配合比是：1∶2～1∶3（质量比）。聚灰比在5%～20%范围以内，水灰比可根据和易性适当选择，大致在0.3～0.6范围以内。各种用途的聚合物水泥砂浆的参考配合比见表5-4。

3. 聚合物水泥混凝土的参考配合比

聚合物水泥砂浆的参考配合比　　表 5-4

用　途	参考配合比（质量比）			涂层厚度 (mm)
	水　泥	砂	聚合物	
路面材料	1	3	0.2～0.3	5～10
地板材料	1	3	0.3～0.5	10～15
防水材料	1	2～3	0.3～0.5	5～20
防腐材料	1	2～3	0.4～0.6	10～15
粘结材料	1	0～3	0.2～0.5	
	1	0～1	>0.2	
	1	0～3	>0.2	

聚合物水泥混凝土的参考配合比见表 5-5。

聚合物水泥混凝土参考配合比　　表 5-5

聚合物与水泥之比 (%)	水灰比	砂率 (%)	聚合物分散体用量 (kg/m^3)	用水量 (kg/m^3)	水泥用量 (kg/m^3)	细骨料用量 (kg/m^3)	粗骨料用量 (kg/m^3)	测定值	
								坍落度 (cm)	含气量 (%)
0	0.50	45	0	160	320	510	812	5	5
5	0.50	45	16	140	320	485	768	17	7
10	0.50	45	32	121	320	472	749	21	7

（二）配制与施工工艺

配制聚合物水泥混凝土时，可使用与普通水泥混凝土一样的设备。聚合物水泥混凝土应在拌和后 1h 内进行施工与使用。养护时，应先湿养护，待水泥水化后进行干养护，以使聚合物成膜。

1. 配制工艺

1）聚合物水泥混凝土的配制工艺与普通水泥混凝土相似，其区别只是将水泥和聚合物共同作为胶结料。通常在加水搅拌混凝土时掺入一定量的聚合物分散体及辅助材料配制、养护而成。

2）聚合物水泥混凝土还可采用单体直接加入，然后聚合的办法制得。

3）采用聚合物粉末直接掺入水泥的方法来配制聚合物水泥混凝土。在混凝土配制和初始硬化后，加热混凝土，使聚合物溶化，这样，聚合物便浸入混凝土的孔隙中，待冷却后聚合物凝固而成。这种聚合物水泥混凝土的抗水性能好。

2. 施工工艺

1）基层处理

打底砂浆或混凝土的基层处理应按下列顺序施工：

（1）边喷砂浆，边用钢丝刷刷去老砂浆或混凝土表面脆性的浮浆层或泥土等，用溶剂（汽油、酒精或丙酮）洗掉油污或润滑油迹。

（2）接打处的孔隙、裂缝等伤痕要进行 V 型开槽，用砂浆进行堵塞修补，对排水沟周围、管道贯通部位也要进行同样的处理。

（3）用水冲洗干净后，用棉纱擦去游离的水分。

2）施工要点

涂一层厚度为 7～10mm 左右的聚合物水泥砂浆。当所需的厚度大于 7～10mm 时，可涂

2～3 次。施工后，必须注意养护。未硬化前不能洒水或遇雨，否则表面将形成一层白色脆性的聚合物薄膜，降低其性能。涂抹聚合物水泥砂浆时应注意：

（1）聚合物水泥砂浆不象普通水泥砂浆那样用抹子抹好几遍，以抹 2～3 遍为宜。

（2）在抹平时，抹子上往往会粘附一层聚合物薄膜，应边抹边用木片、棉纱等将其拭掉。

（3）当大面积涂抹时，每隔 3～4m 要留宽 15mm 的缝。

四、聚合物混凝土的技术性能

（一）聚合物水泥混凝土的主要性能

1. 未硬化前的性能

1）和易性好，达到规定的稠度（坍落度与流动度）所需的水灰比可以随聚灰比的增加而减少，这有利子提高强度和减少干燥收缩。

2）具有合适的加气性，这对子增加稠度与改善抗冻性都具有良好的效果。

3）保水性好。

4）抗泌浆与抗材料分层离析的性能好。

5）有时硬化较慢（由子诸助剂起缓凝作用），但不影响使用。在高温的夏天甚至有利。

2. 硬化后的性能

1）表观密度轻　由于聚合物的密度较水泥的密度轻，所以聚合物混凝土的表观密度亦较轻，通常在 2000～2200kg/m^3 之间。如采用轻集料配制混凝土，更能减小结构断面和增大跨度，达到轻质高强的要求。

2）力学强度高　聚合物混凝土与基准水泥混凝土相比较，不论抗压、抗拉或抗折强度都有显著的提高，特别是抗拉和抗折强度尤为突出，这对减薄路面厚度或减小桥梁结构断面都有显著的效果。

3）与集料的粘附性强　由于聚合物与集料的粘附性强，可采用硬质石料作成混凝土路面抗滑层，提高路面抗滑性、抗磨性。此外，还可做成空隙式路面防滑层，以防止高速公路路面的飘滑和防噪声。

4)耐久性好　聚合物在混凝土中能起到阻水和填隙的作用，因而可提高混凝土的抗水性、耐冻性和耐久性。

（二）影响混凝土性能的因素

1. 影响混凝土强度的主要因素

1）聚灰比

聚合物分散体的种类不同，取得同强度所需的聚合物最佳掺量亦不同。最常用的聚灰比在 15%～20%范围以内。

研究表明，一般情况下，随着聚合物分散体掺量的增加，其抗压强度，弹性模量有增大的趋势，但掺量达一定程度后则有降低的倾向，而抗拉强度、抗弯强度随聚合物的增加而增大。

2）养护方法

养护方法对硬化聚合物水泥混凝土的强度影响很大。一般说来，气干养护可获得较高的强度；在早期进行水中或潮湿养护，后经气干养护可获得最高强度。这是因为早期水中养护，水泥进行水化反应，再由干干燥后能够生成聚合物薄膜的缘故。但应特别注意，不同种类的聚合物分散体，养护方法不同时的影响是大不一样的。如耐水性很差的聚醋酸乙烯酯

(PVAC) 乳浊液，若采用水中养护，其强度将极大地降低。

2. 影响干缩变形的因素

聚合物水泥混凝土的干缩变形较之水泥混凝土（未掺聚合物）大为减少，其原因主要是由于聚合物分散体中界面活性剂的效果，即具有减水的作用，为得到同一稠度所需要的单位用水量少。

但也有的试验资料表明，在使用某些聚合物和某种养护条件等特殊情况下，干缩值有时也可增大。

3. 影响混凝土徐变的因素

使用丁苯橡胶乳液和聚丙酸脂乳液的砂浆徐变系数，比之水泥砂浆要小。但掺有醋酸乙烯脂和马来酸丁基的共聚物乳浊液的砂浆，在室温下徐变则是水泥砂浆的两倍以上，而 50℃ 下徐变更是显著增大，造成破坏。

第三节　玻璃纤维混凝土[66]

玻璃纤维混凝土（简称 GRC）是将弹性模量较大的抗碱玻璃纤维材料，均匀地分布在水泥砂浆、混凝土基材中，所形成的一种复合材料。它具有较高的抗拉强度和抗弯强度，韧性较大，耐冲击性能良好，其堆积密度及导热系数均小于水泥制品，因此可以设计成薄壁或水泥制品不易成型的其它形状的制品。鉴于长期耐久性有待进一步考察，故现阶段主要限于用做非承重或次要的构件或制品。在土木工程中主要用于隔音墙、公路标志、电缆管道、侧沟、挡土墙、桥面底模板等。

一、原材料选择

1. 耐碱玻璃纤维

耐碱玻璃纤维的成分中，由于含有一定量的氧化锆 (ZrO_2)，在碱液作用下此种纤维表面的 ZrO_2 会转化成 $Zr(OH)_2$ 的胶状物，并经脱水聚合在玻璃纤维的表面，形成一层致密的膜层，从而延缓了水泥石液相中的 $Ca(OH)_2$ 对玻璃纤维的侵蚀。

1）化学成分：耐碱玻璃纤维的化学成分见表 5-6。

耐碱玻璃纤维的化学成分　　表 5-6

名称	化学成分（%）								
	SiO_2	Cao	Na_2O	K_2O	ZrO_2	TiO	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3
中国锆钛纤维	61.0	5.0	10.4	2.6	14.5	6.0	0.3	0.25	0.2

2）力学性能：耐碱玻璃纤维的力学性能见表 5-7。

耐碱玻璃纤维的力学性能　　表 5-7

名称	单丝直径（μm）	密度（g/cm^3）	抗拉强度（MPa）	弹性模量（$\times 10^3$MPa）	极限延伸率（%）
中国锆钛纤维	12～14	2.7～2.78	2000～2100	6.3～7.0	4.0

3）品种：耐碱玻璃纤维根据生产工艺不同分为两种。

（1）无捻粗纱　将 30 股左右的连续耐碱玻璃纤维原丝（每束原丝含 200 根左右的单丝）不经加捻直接平行合并卷绕成圆筒形纱，称为无捻粗纱。使用时可由纱团的内孔抽出粗纱，并切割成任意长度。

(2)网络布　系由耐碱玻璃纤维无捻粗纱经、纬相交编织而成的具有方形网孔的织物。根据玻璃混凝土制品或构件受力状况，可织成经、纬纱粗细不同的网格布。常用的网格布规格见表 5-8。

耐碱玻璃纤维网格布的规格　　表 5-8

网格尺寸 (mm)	幅宽 (mm)	经向		纬向		质量 (g/cm)
		经纱密度（根/cm）	承载力（N/cm）	经纱密度（根/cm）	承载力（N/cm）	
5×5	850	4	324	2	151	130

2. 硫铝酸盐水泥

1）化学成分：硫铝酸盐水泥的化学成分见表 5-9。

硫铝酸盐水泥的化学成分　　表 5-9

类别	化学成分（%）						
	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3
早强型水泥	11.38	1.11	1.58	26.53	37.54	2.66	14.53
I 型低碱度水泥	4.53	0.72	0.73	13.83	40.38	2.23	31.67

2）物理力学性能：硫铝酸盐的物理力学性能见表 5-10。

硫铝酸盐水泥的物理力学性能　　表 5-10

类别	比表面积 (cm^2/g)	凝结时间（h）		1∶3 砂浆强度					
		初凝	终凝	抗折强度（MPa）			抗压强度（MPa）		
				3d	7d	28d	3d	7d	28d
早强型	5011	0.88	3.5	2.5	2.8	3.2	39.6	48.8	60.3
I 型低碱度	5800	0.33	0.66	2.2	1.9	3.2	41.5	45.1	64.1

3. 骨料

玻璃纤维混凝土用骨料的规格和质量要求见表 5-11。

骨料质量要求　　表 5-11

	最大粒径 D (mm)	细度模数 M_k	含泥量 (%)
指标	2	1.2～1.4	≤0.3

二、配合比选择

玻璃纤维混凝土的配合比因成型工艺不同而异，详见表 5-12。

不同成型工艺参考配合比　　表 5-12

成型工艺	玻璃纤维	外加剂	灰砂比	水灰比
直接喷射法	抗碱玻璃纤维无捻粗砂，切短长度：33～44mm；体积掺率 2%～5%；	减水剂或塑化剂掺量由预拌试验确定	1∶0.3～1∶0.5	0.32～0.33
喷射—抽吸法	抗碱玻璃纤维无捻粗砂，切短长度：33～44mm；体积掺率 2%～5%	一般可不掺	1∶0.3～1∶0.5	起始值 0.5～0.55 最终值 0.25～0.3
铺网—喷浆法	抗碱玻璃纤维网格布，厚 10mm 的板用层网格布；体积掺率：2%～5%	同直接喷射法	1∶1～1∶1.5	0.42～0.45

注：水泥为早强型或 I 型低碱硫铝酸盐水泥（445～515kg/m^3）；

骨料为 D_{max}=2mm，M_k=1.2～1.4，含泥量≤0.3%

三、玻璃纤维混凝土的成型工艺

玻璃纤维混凝土的浇筑，密实成型和纤维处理等工艺措施有别于传统施工方法。浇筑要有专门设备，密实成型可采用不同类型的平板或插入式振动器、振动台和轮压设备。与普通混凝土相比，纤维混凝土的振动时间要适当延长。采用喷射法成型时可以促进纤维在成型平面内定向排列，而用普通方法浇注和成型时，纤维在混凝土三个平面内是无序排列的。

（一）直接喷射法

直接喷射法的施工工艺原理是将玻璃纤维无捻粗纱切割至一定长度后由气喷出，再与雾化的水泥砂浆在空间内混合，并一起喷落在模具上，如此反复喷射直到混凝土达到要求的厚度。

直接喷射法成型一般采用专门的施工工具 — 喷射枪、砂浆搅拌机、砂浆运送泵、空气压缩机等。喷射枪由砂浆喷射部分和纤维切割部分组成。两部分喷射束形成一个夹角的称双枪式；两部分喷射束相重合的部分称单枪式。

玻璃纤维混凝土直接喷射工艺流程如图 5-4 所示。

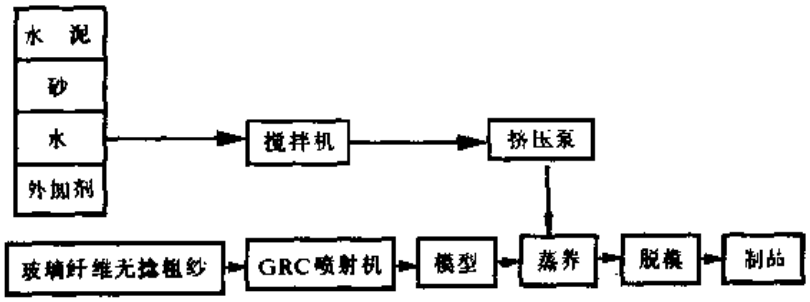


图 5-4　直接喷射法施工工艺流程

（二）喷射—抽吸法

喷射—抽吸法的施工工艺原理与直接喷射法基本相同，所不同的是混合后落在可抽真空的模具上。模具的表面开有许多棋盘式小孔，并覆盖以滤水性好的织物。当喷射到一定厚度后即通过真空抽吸以降低料层的水灰比，并使之趋于密实，从而获得具有一定强度的湿坯。用真空吸盘将湿坯吸出，并形成一定的形状。

四、玻璃纤维混凝土技术性能

（一）物理性能

玻璃纤维混凝土的表观密度为 1900～2100kg/m^3；干燥状态下的吸水率为 10%～15%；其使用温度不宜超过 80℃；抗冻性大于 D25。

（二）力学性能

1. 抗拉强度

玻璃纤维混凝土受拉时，初裂后呈现塑性变形，基材上不断出现裂缝。最终破坏时大部分纤维被拉断，而少部分纤维则由基材中拔出。初裂抗拉强度为 4.0～5.0MPa，极限抗拉强度为 7.5～9.0MPa。

2. 抗弯强度

玻璃纤维混凝土受弯时，最初呈弹性变形，当受拉区的基材出现第一条裂缝（即初裂）后，

试件横断面的应力重新分布，不仅其承载力可继续提高，并且还产生较大变形。与此同时，其受拉区不断出现新的裂缝，最后由于大部分纤维被拉断，少部分纤维被拔出而破坏。初裂抗弯强度为7.0～8.0MPa，极限抗弯强度为15～25MPa。

3. 抗压强度

与增强的水泥砂浆相比变化不大或者略有降低（小于10%）。

4. 韧性

玻璃纤维混凝土在受拉或受弯时具有较大的变形能力，故韧性很高，其受弯时的破坏韧性比未增强的砂浆提高30～120倍。

5. 弹性模量

与未增强的水泥砂浆相比稍有提高，其值为2.6×10^4～3.1×10^4MPa

第四节　改性沥青[67～68,69]

沥青材料是由一些极其复杂的高分子碳氢化合物和这些碳氢化合物的非金属的衍生物所组成的混合物。

通常为了分析方便，并使结果能直观地表现路用或其他工程性能，而将沥青分为几个化学性质比较接近的组分。我国现行方法是将沥青分为饱和分、芳香分、胶质和地沥青质等四个组分。组分含量相同的沥青，它们的技术性质也不尽相同，因为不同的沥青的组分化学结构不同。沥青的化学结构单元中主要有芳环、环烷环和链烃等组成。以石蜡基或中间基原油为原料的国产沥青，往往具有少环、低芳香性和长侧链的特点，所以表现为路用性能较差。

在道路工程中，理想的沥青应在低温时有柔韧性，不脆裂，高温时抗永久变形能力好；在施工温度下粘度低，易于施工；在长时间荷载作用下，不产生永久变形；短时间荷载作用下具有柔韧性。

但是由于沥青的复杂组成结构，使沥青具有复杂的形态。低温时，沥青既硬且脆，这时它呈玻璃态；温度升高至一定时，它开始变软而呈粘弹性状态；温度继续升高，由于趋向流动状态而呈现粘流态。沥青的这种随着温度升高而呈现的脆弹—弹粘—粘流态转化情况，影响了它的路用性，使其低温易脆裂，高温易产生永久变形。在现代繁重的交通条件下，要求沥青兼具高温稳定性和低温抗裂性，掺加改性剂制得改性沥青（复合材料）是解决这一矛盾的有效方法。

常用改性剂及改性沥青性质如下：

一、橡胶类改性沥青

（一）常见橡胶品种

改性沥青中常见橡胶品种有天然橡胶（NR）、丁苯橡胶（SBR）、氯丁橡胶（CR）、聚异戊二烯橡胶（IR）等。

（二）改性沥青的性能

橡胶改性沥青的性能，不仅取决于橡胶的品种和掺量，而且取决于沥青的性质。因为橡胶沥青的性能，取决于橡胶在沥青中的存在状态，亦即取决于两者的相容性，例如采用同一种天然橡胶，其掺加量均为2%，采用相同掺加工艺，对4种不同性质的沥青制备的橡胶改性沥青性能列如表5-13。各种沥青性能改善的程度并不相同。

沥青的性质对改性沥青性质的影响　　表 5-13

沥青名称代号	橡胶改性沥青技术性质			
	针入度 $P_{25℃,100g,5s}$ (1/10mm)	延　度 $D_{5cm\ min}$ (cm)	软化点 $T_{R\&B}$ (℃)	韧性 $T_{25℃}$ (N·cm)
沥青1	94	24	48.0	817
沥青2	91	48	47.0	515
沥青3	96	41	47.5	225
沥青4	94	16	45.5	478

注：加入 2.0%的天然橡胶。

采用相同油源和工艺的沥青（例如本例为一种环烷基直馏沥青），橡胶用量亦相同（例如掺加量为 2.0%），而掺加橡胶的品种不同，所得到橡胶改性沥青性能列如表 5-14。从表 5-14 可以看出，橡胶不同，改性效果不同。

橡胶品种对橡胶改性沥青性质的影响　　表 5-14

沥青原材料名称	橡胶品种	掺加量 (%)	橡胶改性沥青技术性质							
			针入度 (1/10mm)	软化点 (℃)	韧性 (N·cm)	加热试验（160℃5h）		〔赛氏粘度（s）〕		
						加热后针入度 (℃)	针入度比 (%)	140℃	160℃	180℃
直馏沥青	—	0.0	89	45.5	253	88.8	92.4	110	50	27
	天然橡胶 (NR)	2.0	84	50.5	1259	74.2	86.2	271	131	36
	丁苯橡胶 (SBR)	2.0	89	49.5	367	72.7	92.8	251	110	57
	氯丁橡胶 (CR)	2.0	96	47.0	488	74.5	96.1	178	82	37
	聚异戊二烯橡胶 (IR)	2.0	86	46.0	558	98.6	95.8	187	78	36

二、热塑性树脂类改性沥青

用作沥青改性的树脂，主要是热塑性树脂，常见的有：聚乙烯（PE）和聚丙烯（PP）。树脂用于改性沥青的目的，主要是提高沥青的粘度、改善高温抗流动性，同时可增大沥青的韧性，所以它们改善沥青高温性能明显，但低温性能改善有时并不明显。此外，无规聚丙烯（APP），由于它具有更为优越的经济性，所以也经常被用来改善沥青，它与前述相似，高温性能改善效果较好，低温效果不明显，并且抗疲劳性能较差。热固性树脂，例如环氧树脂（BP）亦曾被用来改性沥青，这种改性沥青配制的混合料具有优良的高温稳定性，并具有应力松弛特性。但是由于造价较高，以及其他一些原因，所以较少采用。

三、热塑性弹性体改性沥青

（一）热塑性弹性体的结构和性能

目前常用的热塑性弹性体是苯乙烯—丁二烯嵌段共聚物（SBS），或苯乙烯—异戊二烯的嵌段共聚物（SIS）。

由于在 SBS 的嵌段共聚物中，聚苯乙烯与聚丁二烯在常温下的不相容性，而共聚物中分

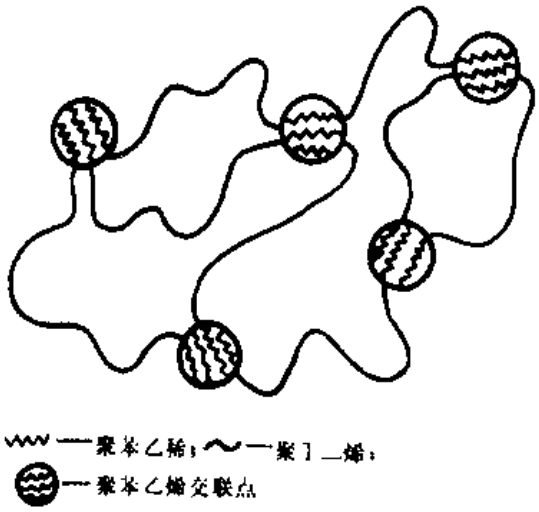


图 5-5　SBS 网络结构示意图

子链之间的聚苯乙烯内聚能密度较大，故其两端首先分别与另外的聚苯乙烯聚集在一起，形成许多有约束作用的物理交联区域，但又因其中嵌段是柔软的聚丁二烯链段，这样就形成了网状结构，如图 5-5。

图 5-5 中聚苯乙烯的交联点不仅起到固定弹性链段的物理交联作用，同时还产生补强作用，效果如硫化胶一样。在低温下，虽然聚苯乙烯交联点有交联作用，但因聚丁二烯的玻璃化温度较低，此时仍有较好的变形能力，所以在很低温度下，SBS 仍具有柔韧性。随着温度的升高，当未达到聚苯乙烯的玻璃化温度（+80℃）前，例如在路面最高温度 60℃时，SBS 仍具有硫化胶的性能，所以 SBS 有较好的稳定性。当温度上升至超过聚苯乙烯的玻璃化温度时，则聚苯乙烯的链段软化，失去交联作用，可以产生流动，所以 SBS 在施工温度时，易于施工。

（二）热塑性弹性体改性沥青的性能

热塑性弹性体由于兼具树脂和橡胶的特性，所以热塑性弹性体改性沥青性能优于树脂和橡胶改性沥青性能。表 5-15 为掺入 5%SBS 改性沥青（A-100）的技术性能。

SBS 改性沥青的技术性质　　表 5-15

沥青名称	高温指标		低温指标		耐久性指标
	绝对粘度 60℃ (Pa.S)	软化点 $T_{R\&B}$ (℃)	低温延度 5℃ (cm)	脆点 F_{reass} ℃	TFOT 前后粘度比 $A=\frac{\eta\ (60℃)\ b}{\eta\ (60℃)\ a}$
1. 原始沥青（针入度 86dmm）	115	48	3.8	−10.0	2.18
2. 改性沥青（针入度 90dmm）	224	51	36.0	−23.0	1.08

注：改性沥青由原始沥青与 5%SBS 及助剂组成。

从表 5-15 知，改性沥青较原始沥青在路用性能上，主要有下列改善：

1. 提高了低温变形能力　原始基础沥青在 5℃时的延度仅为 3.8cm，脆点为−10.0℃，当掺加 5%的 SBS 高聚物及助剂后，5℃时的延度可增加至 36.0cm，脆点降至−23℃。

2. 提高了高温使用的粘度　掺加 SBS 高聚物后的沥青，60℃的粘度可由 115Pa.S 提高为 224Pa.S；同时软化点可相应提高至 51℃。

3. 提高了温度感应性　原始沥青和改性沥青粘度—温度曲线如图 5-6。图 5-6 表明，改性沥青在低温时的粘度较原始沥青降低（具有较好的抗变形能力）。在更高温度（90℃以上），粘度与原始沥青相近（具有较好的易施工性）。

4. 提高了耐久性　采用薄膜烘箱试验（TFOT）的方法，以老化后沥青 60℃时的粘度与原始沥青 60℃的粘度（η（60℃）b）之比值 A 为指标，从表中可看出，掺加聚合物后沥青的 A 值变小，表明其耐久性有了提高。

四、碳黑改性沥青

据我国公路专家姚祖康教授等研究表明，碳黑可明显改善沥青的高温稳定性，同时不影

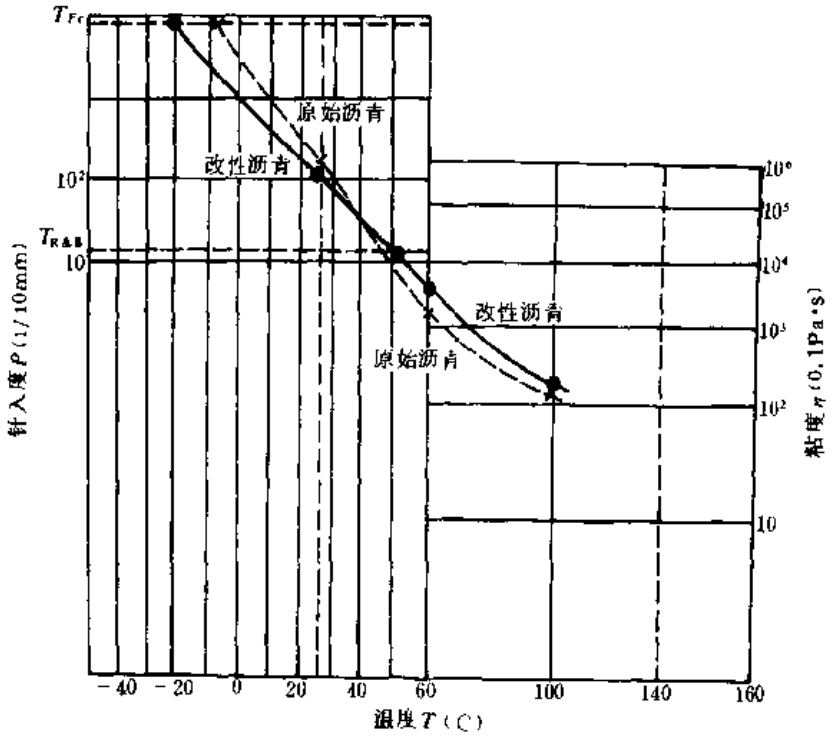


图 5-6　改性沥青的粘度—温度曲线图

响其低温性能，是一种优良的沥青改性剂。

（一）碳黑的结构与性能

碳黑是由含碳元素比例较高的一些物质经过半燃烧所得到的粉状物。目前碳黑的品种很多，性能和用途亦各不相同。根据已有的研究认为，高结构、高耐磨碳黑和超耐磨碳黑等对沥青有很好的增强作用。

碳黑主要含 92%～99%的碳元素和氢氧元素组成，有时有少量的硫元素，此外还有很少量的灰分和沥青杂质。

通过 X 衍射分析得知，碳黑的结晶性很不完整，认为是半结晶性的是一种链状结构，粒子内部以层状定向分布，碳黑的结构如图 5-7。碳黑中每个层面可以有 100 个碳原子，各层面相互平行，且大致距离相等，约为 3.5Å。碳黑层面虽然是等距离和互相平行的，但层面间可移动和转动，两层叠成一个微晶，而由多个这样的微晶体构成一颗碳黑粒子。碳黑粒子可由层面边缘的碳原子、贫氢原子或有游离价以及微晶体外单独层面的任意碳原子（无定形碳）组成。由于这三种不同形式的碳可以在碳黑粒子中共存，故决定了碳黑有较强的活性。上述结构及小颗粒碳黑决定了碳黑不同于一般微填料的改性作用，这种小粒径碳黑可完全分散于沥青膜中（弥散强化作用），起到类似沥青的

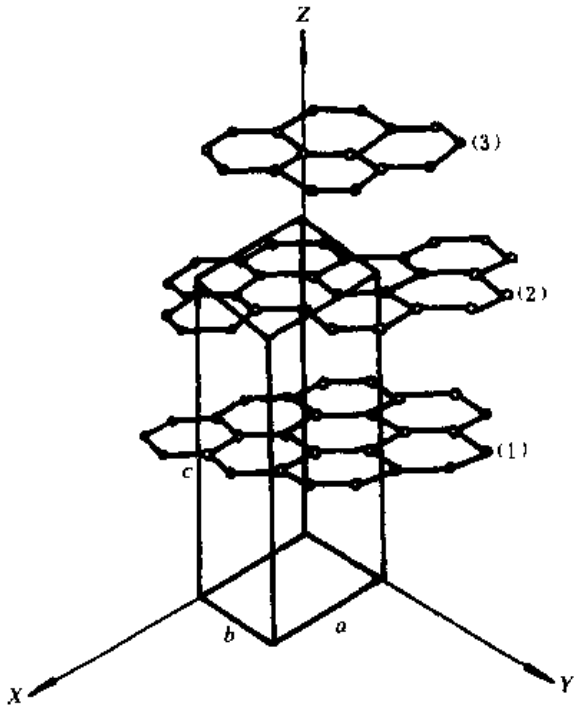


图 5-7　碳黑结构图

作用，而其他填料则只能嵌挤于骨料的颗料之间，起到细料填充作用。

（二）碳黑改性沥青的性能

经预处理后的碳黑，改善其相容性后，可使碳黑在沥青中形成沥青组成中的一个组分，而以沥青为基体，形成“微弥散结构”。表 5-16 为掺加 5%碳黑（BC）的胜利 A-100 沥青改性后的结果。

原始沥青和碳黑改性沥青的技术性质 表 5-16

沥青名称	针入度 $P_{25℃,100g,5s}$ (1/10mm)	软化点 $T_{R\&B}$ (℃)	低温延度 $D_{9℃}$ (cm)	脆点 raass (℃)	粘度（Pa.S）	
					25℃	60℃
原始沥青	86	45	1	−17.7	9.77×10	0.115×10
掺 5%BC 弥散剂改性沥青	66	62	2.3	−15.0	20.58×10	0.224×10

从表 5-16 可知，掺加碳黑后的改性沥青，针入度明显减小，软化点急剧上升，粘度显著增大。这些表明，碳黑改性沥青的高温稳定性有明显提高；但低温（0℃）时延度稍有增加，而脆点稍有升高。这也表明碳黑改性沥青在低温时对抗裂性基本无影响或稍有降低。为兼顾高温稳定性和低温抗裂性，通常碳黑改性沥青应选用粘度稍低的沥青为基料。

五、纤维类改性沥青

纤维类改性沥青在公路工程中的应用，目前具有代表性的是沥青玛蹄脂碎石混合料，它最早出现于 60 年代的前联邦德国，在欧洲称为 Slitt mastix asphalt，在美国称为 Stone Mastric（Matric）Asphalt，缩写为 SMA，从 80 年代起很快在欧美等国得到了应用。所谓沥青玛蹄脂碎石混合料，即由沥青结合料与填料（矿粉）、纤维稳定剂及细集料组成的混合料，填充间断级配的粗集料骨架的间隙，组成一体，形成的沥青混合料（简称 SMA）。

（一）沥青玛蹄脂碎石混合料组成特点

1. SMA 是一种间断级配的沥青混合料，其中 5mm 以上的粗集料（主要是 4.75～16mm）所占比例高达 70%～80%，矿粉的用量达 8%～13%，一般 0.075mm 的通过率高达 10%，粉胶比远超出通常的 1.2 限制，由此形成间断级配，很少使用细集料。

2. 为加入较多的沥青，一方面增加矿粉用量，同时使用纤维作为稳定剂，通常采用木质素纤维，用量为沥青混合料的 0.3%，也可采用矿物纤维，用量为沥青混合料的 0.4%。

3. 沥青结合料沥青用量多，高达 6.5%～7.0%，粘结性要求高，希望选用针入度小、软化点高、温度稳定性好的沥青。

4. SMA 使用的粗集料必须特别坚硬，针片状颗粒少，以便嵌挤良好；细集料一般不用天然砂，必须采用坚硬的人工砂；矿粉必须是磨细石灰石粉，且不使用回收粉尘；纤维稳定剂可采用矿物纤维或木质素纤维。当使用矿物纤维时，要求平均纤维长度小于 6mm，平均纤维厚度小于 5μm，不成纤维的颗粒含量 0.3mm 筛通过率最小 95%，0.075mm 筛通过率最小 65%，使用木质素纤维时，要求平均纤维长度小于 6mm，0.5mm 筛通过率为 60%～80%，600℃加热后灰分含量为 13%～23%，pH 值为 6.5～8.5，吸油值为纤维质量的 4～6 倍。

5. SMA 的施工与普通沥青混凝土相比，拌和时间要适当延长，施工温度要提高，压实不宜采用轮胎碾，通常采用振动压路机碾压。

（二）SMA 改性沥青混合料性能

1. 高温稳定性

改性沥青 SMA 马歇尔稳定度不高，但车辙试验动稳定度却非常高。[68]

2. 低温抗裂性

改性沥青 SMA 混合料的断裂温度大为降低，低温粘结性能显著增大，破坏应变显著增大，并使破坏劲度变小。[69]

3. 水稳定性能

改性沥青 SMA 混合料的残留稳定度均大于 75%，劈裂强度比远大于 70%的要求，因此其水稳定性可以满足使用要求。[69]

六、微填料类改性沥青

常用的微填料有滑石粉（含水硅酸镁）、石灰石粉、白云石粉（碳酸钙和碳酸镁）、云母粉、硅藻土、磨细砂、粉煤灰等。

微填料能降低沥青的感温性，增加粘结力和提高抗老化性能等等，其原理在于微填料能在沥青中很好的润湿、填充和形成骨架结构。

第六章　复合材料试验研究方法

任何种类材料的开发与应用都离不开材料试验。对复合材料所进行的试验主要目的有三：其一是确定材料的基本性能参数，供复合材料结构设计采用；其二，对材料质量进行质量控制与筛选；其三，作为学术研究的手段，譬如从试验的现象中总结出规律、建立模型、验正理论等。因而迄今各国复合材料科学家已发展了许多种试验方法，其中有些方法已经制定了标准；然而，有些试验方法涉及复合材料固有的复杂性，尚不够成熟，需要通过实践和研究来不断地加以改进。目前，如何正确评价复合材料性能，给出可供设计采用的准确参数，是复合材料研究的方向之一。本章将结合道路工程实际着重介绍测定复合材料基本特性参数的试验研究方法。鉴于本书篇幅，有关复合材料具体的测试过程可参见有关标准。

第一节　试验方法总则

一、试验方法分类

复合材料性能试验方法依据试验的试件是否破坏可分为破坏性试验和非破坏性试验。破坏性试验指试验后样品的外形和性能完全破坏，如测定力学性能的拉、弯、冲、剪、压、劈等；非破坏性试验指试验前后样品的外形和性能不变，如产品质量检测中所采用的X光、超声波、声发射、液晶探伤等试验。

按照路用性能及其与此相关所进行的道路复合材料试验可分物理性能测试、静态力学性能测试及耐久性能测试等。本章将重点介绍上述试验研究方法。

二、试样的结构和形态

试样的结构和形态将影响数据的重演性、可比性。如我国1983年以前标准中关于复合材料拉伸性试样，均规定为握铃形，两端宽、中间窄直、过渡区为$R75$圆弧的长条，由于过渡区往往不易精确加工，致使测试过程中高强度试样的断裂常不发生在中间窄直的检测部位而发生于过渡区，致使测试数据报废或重演性极差。1983年标准则改为均匀直条两端加粘本身材料或比本身材料模量低的材料作加强片（加强用材料的厚度为1～3mm）。

三、进行测试时的环境条件和试样的状态调节

许多复合材料对温湿度较敏感，所以为使试样和测定保持相对稳定，各个国家均规定了相应环境要求。表6-1是各个标准所规定的试样测试前的调节要求。

如果试验温度和相对湿度对试验结果没有影响或影响很小时，也可在任意温度和湿度条件下进行，并把试验的实际温度、湿度记入试验结果内。

试样测试前的调节要求　　表 6-1

项　目	ASTMD68--61	FTMS－406	ГССТ 17035-71	GB1466-83
温度（C）	23±2	23±1.1	23±2	23±2
湿度（%）	50±5	50±4	50±5	45－55
调节时间（h）（最少保存小时数）	≤6.35mm 厚度 40 ≥6.35mm 厚度 80	≤3.175mm 厚度 48 ≥3.175mm 厚度 96	＞3	24

四、试件的制备

试件的制备对具体不同的试验有不同的要求。一般最好用铣刀、金刚石刀具或其它工具进行加工，且对加工面用砂纸打磨。对各向异性材料从板材上切取时，应取自板的中间部位，离板的边界距离应符合有关要求，同时还应在母材及试样上标明切取方向。

五、试验时的加载速度

复合材料的力学性能与试验中负荷加载速度密切相关，因此试验时必须选择相应速度。如在我国的拉伸性能试验方法标准中就规定模量时为 2mm/min；测强度时，长方形试片为 10mm/min，握铃形试片为 5mm/min。如嫌这一加载速度太慢，则可采用高速加载。一般情况下，高速加载中测定的数值要高于低速加载，且数值的分散性较大。仲裁试验时，宜取最低规定加载速度。

六、取样、计算和报告[70]

1. 试样的容量

最少测量的样本数量 n 应以平均值 $\overline{X}$、标准差 σ 为基础作数理统计后才能确定。即要求检测中得到的实验值能符合于 Gosset W.S 发表的 t 检验表的分布。如取 t 表的置信区间为 0.95（对复合材料已足够），则 n 很小时，增加 n，t 分布的数值减小很快，但当 n 大于 5 后，即开始变慢，n 大于 10 后，变化就不显著。所以，样本的数量最高不必超过 10，一般取 5 足够，但不得小于 3，n 小于 3 所得的数据是无法进行数据处理的。总之，检验既要考虑到不能取数量 n 过大的试样数，又必须具有与总体统计数值间有最小的允许误差。

2. 计算及报告

对于在测试中得到的一批数据，往往可发现有一个或数个过大或过小的突出数值。有时，测定人员根据主观的判定加以取舍，这就易于引人人为因素，缺乏统一的准则。一批试样的数据来自同一个总体，但由于操作中的疏忽带入了过失误差，或混入另一个总体的数据导致出现过大过小的异常数值。对于怀疑为异常之数据，最好能分析出明确的原因，然后决定取舍。但对此分析往往不易做到，则就应采用统计学上异常数据处理法来决定取舍。对异常数据的取舍可按照 F.E.Crubbs 介绍的异常数据处理方法处理。

假设某一试样的测试值呈正态分布，则各测定值可按大小依次排列，再假定一个危险率（即把正常数据判为异常数据的概率），依 $T=|\overline{X}-X_i|/S$ 公式计算。式中 T 为表值；$\overline{X}$ 为测定的平均值；X_i 为任一次的测定值；S 为标准差。将计算结果与表 6-2 的 T 值相比，大于 T 值表的 X_i 则舍去，小于 T 值表的均为正常数据。

用此法作判别时，应注意危险率不能选得过小，因为过小，能把原属异常的数据判为正

常，反之如危险率选择过大，则易把正常数据判为异常。这些情况都将提高误差的出现概率、降低准确性。

依照规定的标准进行检测和计算后，应以试验报告形式作为试验结果。

Crubbs T 值表 表 6-2

危险率	测定次数											
(%)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
5	1.15	1.46	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.23	2.29	2.33	
2.5	1.15	1.48	1.71	1.89	2.02	2.13	2.21	2.29	2.36	2.41	2.46	
1	1.15	1.49	1.75	1.94	2.10	2.22	2.32	2.41	2.48	2.55	2.61	
危险率	测定次数											
(%)	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
5	2.37	2.41	2.44	2.47	2.50	2.53	2.56	2.58	2.60	2.62	2.64	2.66
2.5	2.51	2.55	2.59	2.62	2.65	2.68	2.71	2.73	2.76	2.78	2.80	2.82
1	2.66	2.71	2.75	2.77	2.82	2.85	2.88	2.91	2.94	2.96	2.99	3.01

第二节 物理性能测定

一、相对密度测定

相对密度是在相同温度下，物质的一定体积的质量与同体积水的质量之比。在研究复合材料的基本物理性能时，相对密度是不可缺少的数据。

（一）相对密度的测定方法

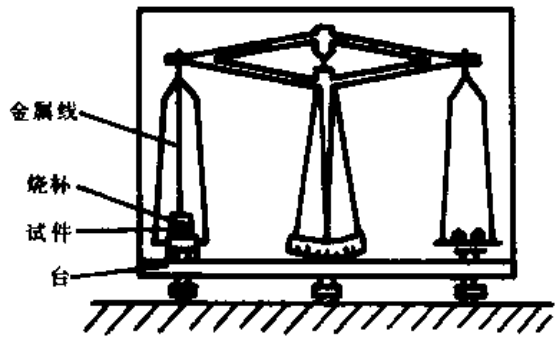


图 6-1 相对密度试验方法

相对密度的测定按水置换法进行，其实验原理如图 6-1 所示。

基本操作为：

(1)首先把试件用直径小于 0.1mm 的金属线系紧，在 20℃±0.5℃的空气中准确称重至 0.1mg。

(2)把赶走了空气泡的浸渍液装入烧杯里，在保持 20±0.5℃的温度下，并在不接触天平可动部分的情况下，把它放在台座或固定支持台上。

(3)把用金属线系紧的试件浸入浸渍液中，并把金属线的另一端悬挂在天平上。

(4) 把附着在试件表面的空气泡用金属丝等赶走之后，称量它的质量准确到 0.1mg。

（二）注意事项

相对密度的测定宜在恒温的室内，当温度同标准温度有较大差别时宜采取快速测定方法。

对于那些同水的润湿性能不好的纤维复合材料，在放入水中称重之前必须除去其表面的气泡，也可以用甲醇、乙醇等代替蒸馏水作浸渍液。

（三）试验结果计算

相对密度由下式计算：

$$\rho = \frac{a}{a-b} \tag{6-1}$$

式中：a——试件在空气中的质量；

b——试件在浸渍液（水）中的质量。

试验应进行两次以上，并计算其平均值到小数点后三位数。

二、纤维百分含量测试

纤维增强复合材料中纤维百分含量有质量百分比和体积百分比之分。在一般情况下均是先测定其质量百分比 W_f，然后再按下式换算为体积百分比 V_{f_n}。

$$V_f = \frac{W_f}{(1-W_f)\rho_f/\rho_m + W_f} \tag{6-2}$$

纤维增强复合材料中纤维质量百分含量的测试方法因纤维和基体的品种不同而有完全不同的测试方法，下面仅介绍土木工程中常用到的复合材料的纤维质量百分比的测试方法。

（一）玻璃纤维增强树脂（玻璃钢）的纤维质量百分含量测定方法

玻璃纤维增强树脂的纤维百分含量可根据玻璃纤维增强树脂的质量减少测得的树脂含量 W_R 和填料含量 W_T 求出：

$$W_f = 100 - W_R(\%) - W_T(\%) \tag{6-3}$$

1. 树脂含量的测定方法

将被测的玻璃纤维增强塑料加工成边缘光滑的 2g 以上的试件。

测试设备有感量 1mg 的化学天平、能恒温 625±2℃的电热茂福炉、瓷质或金属制的坩埚、装有氯化钙干燥剂的干燥器。

试验操作过程如下：

（1）把坩埚在 625±2℃的电热茂福炉中干燥至恒重，并在干燥器中冷却。

（2）称取坩埚的质量 M_1 及坩埚中装有试件时的质量 M_2，精确到 1mg。

（3）把装有试件的坩埚在酒精灯上加热至试件的燃点使其燃烧，待燃烧停止后，再用 625±2℃的电热茂福炉加热，直到试件中的碳完全烧净之后，移至干燥器中冷却 30min，再称取灼烧后的坩埚和试件质量 M_3，精确到 0.1mg。

（4）对每一个试件，按下式算出树脂含量 W_R，试验采用三个试件并求其平均值。

$$W_R = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100\% \tag{6-4}$$

2. 填料含量的测定方法

填料的含量一般较难从玻璃纤维增强塑料中测得，但在一定条件下也可以进行测定。

如果所用树脂能满足树脂完全燃净，又不会使燃烧后的玻璃纤维变脆，则可以用恰当地烧去树脂的方法。但如果烧过之后玻璃纤维变脆，它和填料就难分离。另外，如果温度升得太高，玻璃纤维就会熔融。对普通的试件在 625℃的温度下经过 1～2h 就能得到较好的结果。

玻璃纤维和填料均为无机物，因为性质相似，故经过燃烧后，它们都残余下来。如果烧法恰当，给予轻微连续的振动就可以简单地把玻璃纤维和填料分离。分别称取燃烧前的试件质量 M_1，燃烧分离后的纤维质量 M_2 和填料质量 M_3，就可求得填料百分含量：

$$W_T = \frac{M_3}{M_1} \times 100\% \tag{6-5}$$

（二）拌合物钢纤维体积率测定方法

1. 试验方法及步骤

钢纤维体积率应测定两次，测定步骤如下：

（1）装料并振实

坍落度不大于 50mm 的拌合物，用震动台振实。应一次将拌合物灌到高出容量筒口，装料时用震槌稍加敲振。振动过程中如拌合物沉落低于筒口，应随时添加，直至表面出浆。

坍落度大于 50mm 的拌合物，用震槌振实。5L 容量筒按 1/2 高度分层装入拌合物，大于 5L 容量筒按 100mm 分层。震槌沿容量筒侧壁均匀敲振，每层 30 次。敲振完毕后，将直径 16mm 的钢棒垫在筒底，左右交替将容量筒颠击地面各 15 次。

（2）倒出拌合物，边水洗边用磁铁搜集钢纤维。

（3）将搜集的钢纤维在 105±5℃的温度下烘干至恒重，冷却至室温后称其质量，精确到 2g。

2. 试验结果计算

钢纤维体积率按下式计算：

$$V_{sf} = \frac{m_{sf}}{\rho_{sf} V} \times 100\% \tag{6-6}$$

式中：V_{sf}——钢纤维体积率（%）；

m_{sf}——容量筒中钢纤维质量（g）；

V——容量筒容积（L）；

ρ_{sf}——钢纤维密度（kg/m³）。

两次测定值的平均值即为钢纤维体积率。若测定值不符合下列条件，则试验结果无效。

$$|V_{sf1} - V_{sf2}| \leqslant 0.05 V_{sf,m} \tag{6-7}$$

式中：$V_{sf,m}$——两次测定钢纤维体积率的平均值；

V_{sf1}，V_{sf2}——分别为两次测得的钢纤维体积率。

三、土工织物孔径试验

土工织物具有各种形状和大小不同的孔径，其孔径大小的分布曲线类似于土的颗粒级配曲线。孔径的符号以 O 表示，单位为 mm，并用其下标表示织物孔径的分布情况，例如 O_{95}表示织物中 95%的孔径低于该值。表示织物特征孔径的方法有：有效孔径 O_r 及等效孔径 EOS。目前普遍采用 EOS，其含意相当于织物表观最大孔径，也就是土颗粒能通过织物的最大粒径。不同的标准对 EOS 的规定不同，目前我国多取 O_{95}。国内外各单位有关对 EOS 的规定见表 6-3 及表 6-4。

国际上关于筛分法的一些规定　　表 6-3

国家及机构	试样尺寸（mm）	试样数量（次）	试验时间（min）	试验方式	颗粒材料	等效孔径取用	备注
美国 ASTM	Φ200	5	10	干振	玻璃珠	O_{95}	1984
法国 ISO	100×100	20	1200	水动力	砂	O_{95}	建议 1984
法国 RILEM	≥Φ200	17	5	干振	砂	$O_{98}$$O_{95}$	1984
瑞士 ISO	Φ180	3	15	湿振	砂	O_{95}	建议 1985
荷兰 NNI	Φ260	5	5	干振	砂	O_{90}	1985
联邦德国 DIN	Φ180	3	15	湿振	砂	O_{90}	标准 1985
比利时 MPW	Φ200	17	5	干振	砂		

国内关于干筛法的一些规定　　表 6-4

序号	摇摆频率（次/min）	摆辐（mm）	拍击频率（次/min）	振筛时间（min）	颗粒材料	颗粒投放量（g）	*EOS*
1	130	30	136	20	砂	30～50	O_{90}
2	221	12.5	147	20	石英砂	50	$O_{98}O_{95}O_{90}$
3	316		158	20	玻璃珠	100	O_{95}
4	221	12.5	147	30			O_{90}
5	50	0.85		10	砂或玻璃珠	100	O_{95}
6	230	12	175	20	石英砂	50	O_{95}

注：1-交通部一航局科研所；2-河北省水利水电勘察设计院；3-水利电力部水利水电科学研究所；4-河北省水利科学研究所；5-黑龙江省水利科学研究所；6-武汉水利电力学院。

1. 干筛法

将试验的织物固定在 2mm 细筛网的底盘上作筛布，然后将已率定好粒径的颗粒材料放在筛布上振筛。秤量通过的颗粒质量得过筛量，可计算出该粒径材料截留在织物内部和上部的颗粒质量占总投放量的百分比——筛余率。更换不同粒径的颗粒和织物的试样进行平行试验，绘制筛余率与孔径的关系曲线，如图 6-2 所示，用以判定织物孔径的分布情况，并确定特征孔径，如 O_{95}等。

颗粒材料可用标准砂或玻璃珠。粒料洗净烘干后用筛析法（见土工试验规程 SD128-006-84）制备分级标准颗粒。试验时取标准颗粒 50g，振筛时间为 20min，同级标准颗粒材料更换试样，进行 5 次平行试验。

玻璃珠或标准砂与织物试样反复摩擦，容易发生静电吸附效应，使试验结果产生偏差。

此外干筛法试验还受温度、湿度的影响，因此试验结果有一定的离散性。但因其操作简便，可以利用土工试验的已有设备，且积累了较多的经验，因此仍为国内外许多单位所采用。

2. 湿筛法

湿筛法与干筛法基本相似，只是在筛动过程中，把水喷洒在织物试样和颗粒材料上，最后量测通过试样的颗粒材料的质量。装置设备如图 6-3 所示。

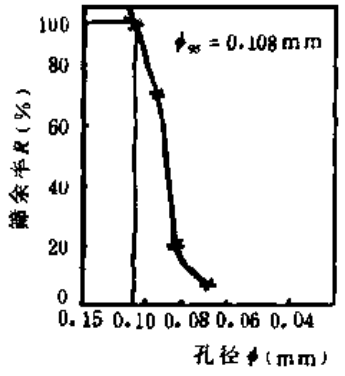


图 6-2　孔径分布曲线

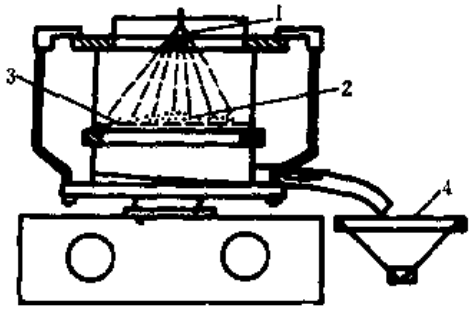


图 6-3　湿筛法装置图

1-喷嘴；2-标准砂；3-土工织物；4-过滤纸

湿筛法试验的颗粒材料有两种组合方法：

（1）分级标准颗粒材料法：与干筛法相同。

（2）混合标准颗粒材料法：把各种粒径的材料混合起来，组成级配良好的标准颗粒，放在织物试样上进行筛分，再把通过织物的颗粒进行颗粒分析。有效孔径 O_r 用 D_w 表示，D_w 相当于 O_{95}或 O_{90}。

四、钢纤维混凝土干缩试验

（一）试验要求

本试验采用 100mm×100mm×515mm 或 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件。试模两端板中心留孔，并预埋测头或做成埋设测头的凹坑。测头用不锈、耐磨的金属制成，图 6-4 示出预埋测头和后埋测头。

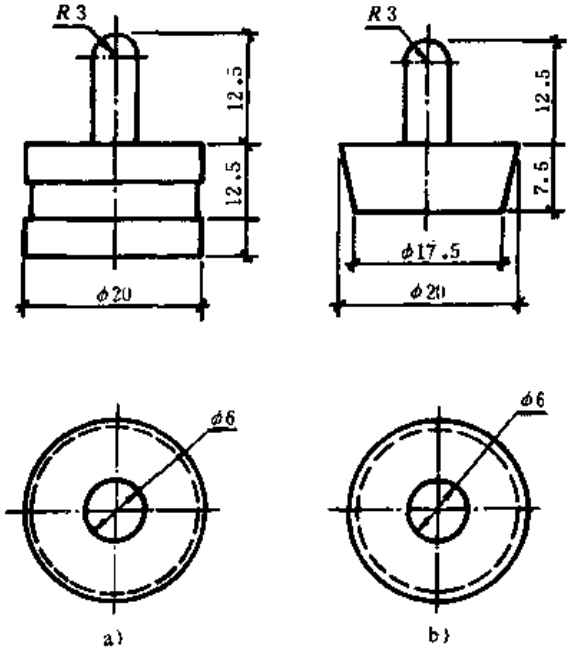


图 6-4　干缩测头（尺寸单位：mm）

a）预埋测头 b）后埋测头

每组 3 个试件，其制作应符合标准规定。试件成型后即送入标准养护室，带模养护一昼夜，拆模固定后埋测头或加固预埋测头，送回养护室。

（二）试验步骤

1. 试件达到 3d 龄期即从标准养护室移入恒温恒湿室测定基准长度，然后将试件置于不吸水的格架上，试件间距应不小于 30mm。

2. 试件的干缩龄期从测定基准长度后算起。按 1、3、7、14、28、45、60、90、120、150、180d 或指定的龄期测定长度。

3. 每次测长前均需测定标准杆的长度，测长应重复 3 次，取 3 个读数的算术平均值为测定值。

（三）试验结果计算

钢纤维混凝土的干缩率按下式计算：

$$\varepsilon_{fc,shv}=\frac{(l_o-l_t)-(l_{nom,o}-l_{nom,t})}{l_o-2l_{mea}} \tag{6-8}$$

式中：$\varepsilon_{fc,shv}$——干缩龄期为 t 时钢纤维混凝土的干缩率；

l_o——试件的基准长度（mm）；

l_t——干缩龄期为 t 时试件的长度（mm）；

$l_{nom,o}$——测基准长度时标准杆的读数（mm）；

$l_{mm,t}$——干缩龄期为 t 时标准杆的读数（mm）；

l_{mea}——试件测头的全长（mm）。

取 3 个试件测值的算术平均值作为该组试件的干缩率，计算结果精确到 1.0×10^{6}。

第三节　静态力学性能测试[70]

一、拉伸性能测试

（一）测试项目

对单向复合材料和织物双向复合材料可以测定：纵向拉伸模量、横向拉伸模量、主泊松比和纵向拉伸强度与横向拉伸强度。

对多向对称层合板可以测定：拉伸模量、泊松比和拉伸强度。

（二）试件制作

拉伸试样设计要求是在试样工作部分形成均匀拉伸应力场，并保证破坏发生在试样工作部分。目前，广泛采用的是等横截面，端部粘上加强片的直条试样。直条试样形状简单，易于加工。在一根试样上可以同时测定拉伸强度、拉伸模量和泊松比，也适用于不同铺层方向，0°、90°和多向层合板的拉伸性能测试。推荐的试样几何形状和尺寸分别见图 6-5 和表 6-5。端部加强片可用厚度为 2-3mm 正交铺层的玻璃纤维增强塑料板或厚度为 1-3mm 的铝板。加强片的长度是考虑胶接剪切强度和试样的拉伸强度确定。试样试验时，通常不粘贴端部加强片。

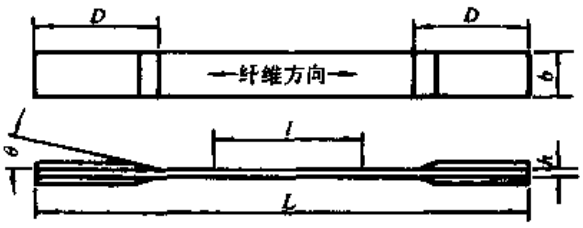


图 6-5　拉伸试样几何形状

L-试样总长；h-试样厚度；D-加强片长度；b-试样宽度；l-工作段长度；θ-加强片倒角

拉伸试样尺寸（单位：mm）　　表 6-5

尺寸 / 试样类别	L	b	h	l	D	θ
0°	230	12.5±0.5	1～3	100	50	≥15°
90°	170	25±0.5	2～4	50	50	≥15°
0°/90°	230	25±0.5	2～4	80	50	≥15°

注：（1）伸载试样的厚度为 2.0±0.2m；

（2）测定泊松比时也可采用无加强片的试样；

（3）多向层合板采用 0°/90°试样尺寸。

试验条件首先要保证试样工作部分产生尽可能接近单一的轴向拉伸荷载，严防偏轴加载现象发生。为避免偏轴加载现象发生，试样加强片的粘贴要保证对称，试样安装要尽可能保证试样的轴线与试验机上下夹头中心线一致。偏轴加载引起的附加弯矩影响，可采用在试样两面对应粘贴应变片、通过电桥自动消除。

（三）注意事项

纵向拉伸强度测试时，加载速度按最大应变速率 $d\varepsilon_{max}/dt=$（1～2）%/min 确定。加载速度 V 是两夹间试样部分的变形速度，即

$$V \approx \frac{d\varepsilon_{max}}{dt}(1+2D) \tag{6-9}$$

式中：V——夹间试样部分的变形速度；

l——试样工作段长度；

D——试样工作段与夹持段之间过渡区长度，约为1～2倍的试样宽度。

加载速度通常取 $V=1\sim6$mm/min。

弹性模量测试时，应变 ε 的测量是关键问题。常用的应变测量方法很多，各有特点。弹簧片式引伸计（又名应变卡、双悬臂式引伸计），具有使用简便、连续测量、再现性好等优点，测量标距可达25～50mm，所得结果更有代表性，目前已被广泛使用。电阻应变片也常使用。应变片粘贴质量和胶层厚度将对测试结果产生影响。

泊松比的测试采用与弹性模量相同的方法，同时测出纵向应变和横向应变，然后由泊松比定义计算出数值。测定时，纵向应变和横向应变两者的测量精度可能不同，但对泊松比测定结果的影响可以忽略。

最后，介绍横向拉伸性能测试特点。树脂基单向纤维增强复合材料的横向拉伸强度仅为纵向拉伸强度的1/20～1/40。同时，影响横向强度的因素也很多，有纤维方向与施加荷载方向不垂直、空隙、夹杂、贫胶、富胶等工艺缺陷和由于机械加工造成的试样边缘裂纹等。因此，横向拉伸性能分散性较大。具体试验条件与要求和纵向拉伸相同。试样安装和调整更要严防发生偏轴加载现象，加载一定要平稳，防止冲击，以免试样提前破坏。加载速度以0.5～1.0mm/min为宜。对单向板横向泊松比，由于其值很小约0.015左右，一般由计算得出

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{\gamma_{12}}{\gamma_{21}} \tag{6-10}$$

具体试验条件与要求见《复合材料测试规程》(GB3354-82)。

（四）试验结果计算

1. 屈服强度 σ_y、拉伸强度 σ_{max}、破坏强度 σ_b、给定应变屈服强度 σ_f 可用下式计算：

$$\sigma = P/A \tag{6-11}$$

式中 σ——屈服强度、拉伸强度、破坏强度、给定应变屈服强度（MPa）；

P——在屈服时、最大荷载时、破坏时、给定应变时的荷载（N）；

A——试件的最小初始截面积（mm^2）

2. 屈服延伸率、破坏延伸率、最大荷载时的延伸率可用下式求得：

$$\varepsilon=\frac{l-l_o}{l_o}\times 100(\%) \tag{6-12}$$

式中：ε——屈服延伸率，破坏延伸率、最大荷载时的延伸率；

l——屈服时、破坏时、最大荷载时的试件标距长度（mm）；

l_o——试验前试件标距长度（mm）

3. 拉伸弹性模量

拉伸弹性模量由应力应变曲线上初始直线部分来计算：

$$E=\Delta\sigma/\Delta\varepsilon \tag{6-13}$$

式中：E——拉伸弹性模量（MPa）；

$\Delta\sigma$——直线上2点间平均原截面积的应力差（MPa）；

$\sigma\varepsilon$——对应 $\Delta\delta 2$ 点上的应变差。

4. 拉伸屈服应力

拉伸屈服应力为给定的永久变形这一点同应力应变曲线上初始直线部分平行引出的直线和应力应变曲线交点的应力：

$$\sigma_{os} = P_{os}/A \tag{6-14}$$

式中：σ_{os}——对应于给定永久变形的屈服应力（MPa）；

P_{os}——对应于给定永久变形的荷载（N）；

A——试样的最小原截面面积（mm^2）。

5. 拉伸割线弹性模量

在不预加荷载的情况下，对应于给定应变的应力值用下式求得：

$$E_{sc} = P_s/(\varepsilon A) = P/\varepsilon A \tag{6-15}$$

式中：E_{sc}——给定变形时的拉伸割线弹性模量（MPa）；

P_s——产生应变 时所需要施加的荷载（N）；

ε——由 P_s 所产生的变形；

A——试件最小原截面面积（mm^2）。

以上实验结果的分析计算可按图 6-6 中不同的应力应变曲线类型作相应的分析。

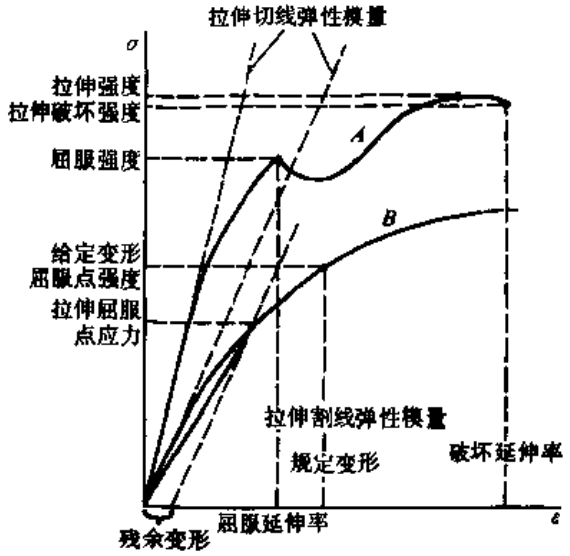


图 6-6 拉伸应力应变曲线

二、压缩性能测试

（一）试验项目

压缩试验可测定报告以下几项参数：压缩弹性模量、抗压强度、压缩屈服强度、压缩破坏强度、压缩屈服点应力、压缩破坏变形和压缩屈服变形。

（二）试件制作

为了防止压缩试件产生失稳，规定试件不论是正方体、长方体、圆柱体或圆管等哪一种形状，它的高度 h、细长比 λ 和最小转动惯量半径 k 之间有如下关系：

$$h = k\lambda \tag{6-16}$$

k 可由截面面积 A 和最小主惯性矩 I 求出：

$$k = \sqrt{I/A} \tag{6-17}$$

对各种截面形状的试件其 h、λ、k 的计算公式见表 6-6。

不同形状的压缩试件几何性质　　表 6-6

试件	正方柱体	长方柱体	圆柱体	圆管
几何尺寸	边长为 a 高为 h	长为 c 宽为 b 高为 h	直径为 d 高为 h	外径为 d_1 内径为 d_2 高为 h
截面积 A	a^2	bc	$\pi d^2/4$	$\pi(d_1^2-d_2^2)/4$
截面惯性矩 I	$a^4/12$	$bc^3/12$	$\pi d^4/64$	$\pi/64(d_1^4-d_2^4d-d)$
最小转动惯量 K	$a/3.46$	$b/3.46$	$d/4$	$(d_1+d_2)/4$
高度 h	$\lambda a/3.46$	$\lambda b/3.46$	$\lambda d/4$	$\lambda(d_1+d_2)/4$
细长比 λ	$3.46h/a$	$3.46h/b$	$4h/d$	$4h/(d+d)$

目前，压缩试验多采用楔铁式组合夹具试验方案（见 GB3856—83），如图 6-7 所示。试样为直条试样，常用厚度 2mm，工作部分的长、宽比约为 2。为了实现均匀施加压缩荷载，试样夹持部分特别长，约为试样宽度的 10 倍。试样几何形状和尺寸见图 6-8，主要用于 0°、90°和 0°/90°层合板。由于该试样工作长度较短，应变只能使用应变片测量。模量和强度测试结果会遇到端头效应。该试验不能进行偏轴压缩和拉压疲劳试验。复合材料的压缩试验也可采用四点弯曲法（图 6-9）和蜂窝夹芯试样轴向压缩试验法（图 6-10），

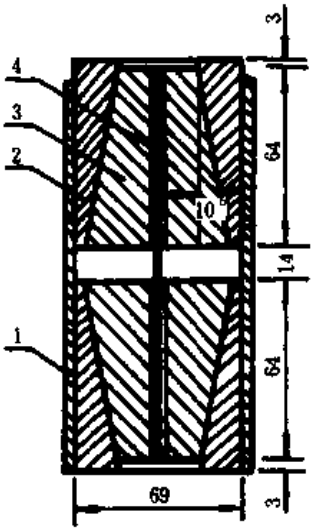


图 6-7　压缩夹具组装图（尺寸单位：mm）
1-套筒；2-圆形外夹头；3-内夹头；4-试样

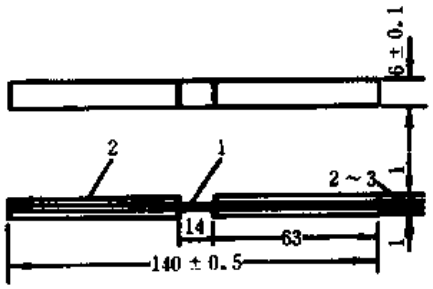
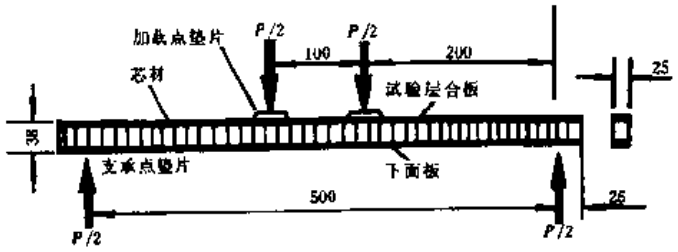


图 6-8　压缩试样几何形状和尺寸（尺寸单位：mm）
1-试样；2-加强片



加载点垫片宽1.0mm；支承点垫片1.5mm

图 6-9　四点弯曲法（尺寸单位：mm）

这两个方法均适合于复合材料多向层合板压缩性能测试。

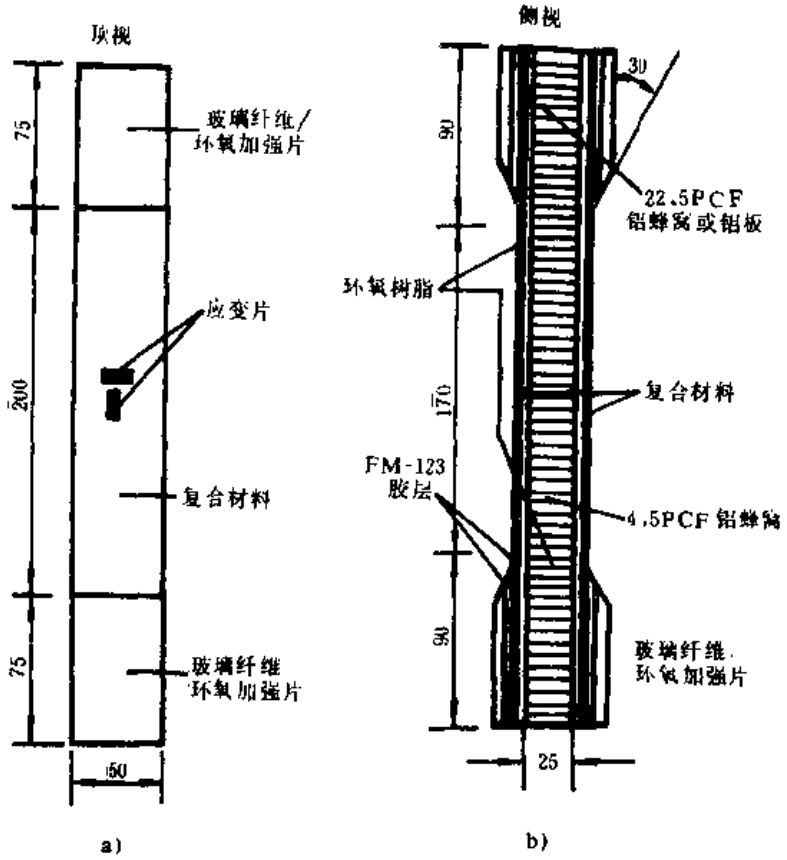


图 6-10　建议的压缩试样（尺寸单位：mm）

（三）注意事项

1. 压缩试验的试件两端面的平行度要满足标准要求，如果平行度不好就很容易发生失稳，并容易引起端面局部破坏或因弯矩的作用而引起破坏条件的变化，从面使得压缩弹性模量及压缩强度等特性值产生明显的误差。为了防止这些现象的产生，除确保试件端面的平行度外，端面加工精度要高，且最好涂上少量润滑油。当试件长细比较大，端部加工又困难时，最好采用图 6-11 中的夹具及带加强区的试件。

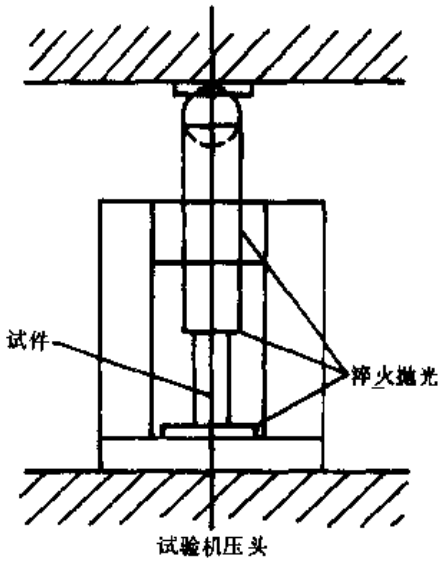


图 6-11　压缩试验夹具

2. 对叠层板、棒、管等纤维增强复合材料试件，其切取的位置和方向不同，压缩的各项性能也完全不同，试件表面有无涂层对实验结果也有影响，一定要注意标记明确。

3. 对薄板进行压缩试验时，尽管可以测定其弹性模量，但因所采用的夹具不同，破坏情况也不同。另外，比夹具突出的试件端部容易破坏，在实验中要充分注意。

（四）试验结果计算

1. 压缩强度 σ_{max}、压缩屈服强度 σ_y、压缩破坏度 σ_b 的计算式如下：

$$\sigma = P/A \tag{6-18}$$

式中：σ——压缩强度、压缩屈服强度、压缩破坏强度（MPa）；

P——压缩最大荷载时、屈服时、破坏时的荷载（N）；

A——试件原截面面积（mm^2）。

2. 压缩屈服点应力 σ_s 或偏移屈服强度

压缩屈服点应力 σ_s 是荷载变形曲线和以特定给定的永久残余变形量（一般取为变形量的2%）为起点，向上述曲线直线部分引平行线的交点处的应力，参考图 6-6。

3. 压缩破坏变形及压缩屈服变形

压缩破坏变形和压缩屈服变形是直到试件压缩破坏时或屈服时试件高度的变化量除以试件原高度的百分数。

$$\varepsilon = \Delta h/h \times 100\% \tag{6-19}$$

4. 压缩模量

压缩模量是压缩荷载变形曲线上弹性极限以内的直线部分的斜率，是以应力应变变化的比表示的。

三、剪切性能测试

（一）纵向剪切性能试验

单向复合材料纵向剪切性能、剪切强度和剪切模量，是结构设计中必须的重要工程常数。

纵向剪切性能试样设计要保证复合材料处于“纯剪切”应力场作用之下。单向复合材料固有的多相性和各向异性，使实现“纯剪切”加载在试验技术上是比较困难的。同时，纵向剪切性能又较低，因此引起了广大学者的重视，开展了大量研究工作，提出了很多试验方法。这些方法大致可以分为：扭转法（薄壁管扭转法、实心圆杆扭转法）、剪切法（方平板对角拉伸法、轨道剪切法）、偏轴拉伸法（偏 10°拉伸法、45°偏轴拉伸法和±45°偏轴拉伸法）以及扭弯法（方平板扭弯法）。从试验方法标准化的角度进行综合分析，目前公认采用±45°偏轴拉伸法较为适宜。GB3355-83 即采用了±45°偏轴拉伸法。±45°偏轴拉伸法采用〔±45°〕直条试样，具有测试数据重复性好等优点。试样几何形状和尺寸如图 6-12 所示。剪切弹性模量 G_{LT} 和剪

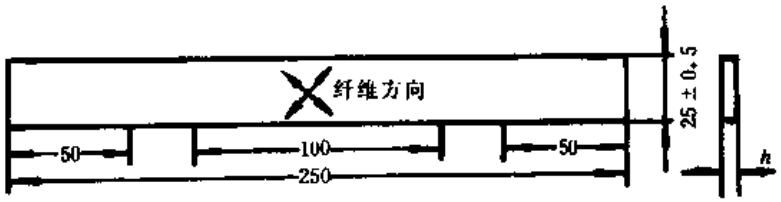


图 6-12　±45°偏轴拉伸试样（尺寸单位：mm）

切强度 τ^b_{LT} 的计算公式分别为

$$G_{LT} = \frac{\Delta P}{2bh} \times \frac{1}{\Delta\varepsilon_x - \Delta\varepsilon_y} \tag{6-20}$$

$$\tau^b_{LT} = \frac{P_b}{2bh} \tag{6-21}$$

式中：ΔP——荷载应变曲线直线段选取的荷载增量；

$\Delta\varepsilon_x$——与 ΔP 对应的试样轴向应变增量；

$\Delta\varepsilon_y$——与 ΔP 对应的试样轴线垂直方向应变增量；

P_b——试样破坏时的最大荷载；

b，h——分别为试样宽度和厚度。

最新的研究成果提出了 Iosipescu 剪切试样测定剪切性能的试验方法，详见图 6-13 至图 6-15。这种试验方法试件上作用有两个力矩，使中间截面上产生纯剪切应力状态，剪应力计算公式如下：

$$\tau = P_b/(uw) \tag{6-22}$$

式中：τ——剪切应力；

P_b——试样剪切破坏时的最大荷载；

u——缺口处试件宽度；

w——缺口处试件高度。

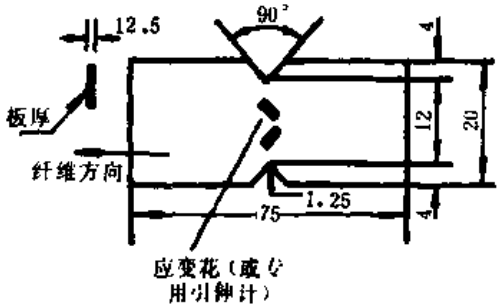


图 6-13 Iosipescu 剪切试样（尺寸单位：mm）

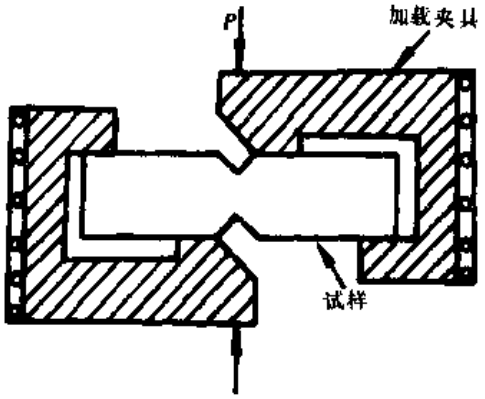


图 6-14 Iosipescu 试样加载夹具（尺寸单位：mm）

（二）层间剪切强度测试

层间剪切强度试验是测定平行纤维层间受剪切应力作用时的极限强度，用于质量检测。常用短梁层间剪切试验和压缩层间剪切试验。

1. 短梁层间剪切试验法

短梁层间剪切试验是采用短梁试样，试样跨厚比 $l/h=4\sim5$，三点弯曲加载实现层间剪切破坏的试验方法。试样几何形状和试验装置与弯曲试验相同。试样宽 6mm，长 $5h+10$mm，厚度为 h。

短梁试样在三点弯曲荷载作用下，试样内应力分布受接触点应力影响很大。因此，按直梁平面弯曲理论进行短梁层间剪切强度的计算。实际上是一种假定计算，是表观水平剪切强度。

$$\tau = 3P_b/(4bh) \tag{6-23}$$

式中：P_b——试样破坏时的最大荷载；

b，h——试样的宽度和高度。

通常认为，这个性能既受基体材料性能影响，更受纤维-基体的胶接性能（界面性能）影响。因此，短梁层间剪切试验特别适用于检验纤维-基体胶接性能和评价基体材料在复杂受力下的性能，是一种基体筛选和工艺质量控制试验方法。

短梁层间剪切试样的合理破坏形式为中间单层剪切破坏或多层剪切破坏。跨厚比为 4～5 就是按试样发生层间剪切破坏确定的。如果跨厚比为 3，试样将产生严重的挤压破坏。

试样较小的跨厚比要求尽可能低的加载速度，一般取 0.5～1.0mm/min。采用较大的加载速度，如 5～10mm/min，试样容易发生折断破坏。

2. 压缩层间剪切试验

压缩层间剪切试样如图 6-16 所示。试样缺口采用研磨砂轮切割。缺口深 $t/2+0.25$mm，

且使缺口穿透层合板的中心层。缺口的圆角半径 0.125mm。试验加载速率 1.25mm/min。压缩层间剪切强度 S 为：

$$S = P_b/(bl) \tag{6-24}$$

式中：P_b——压缩破坏荷载；

b——试件宽度；

l——试件高度。

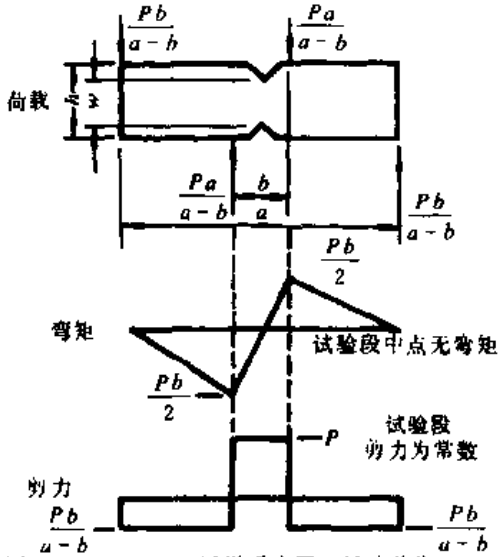


图 6-15 Iosipescu 试样受力图（尺寸单位：mm）

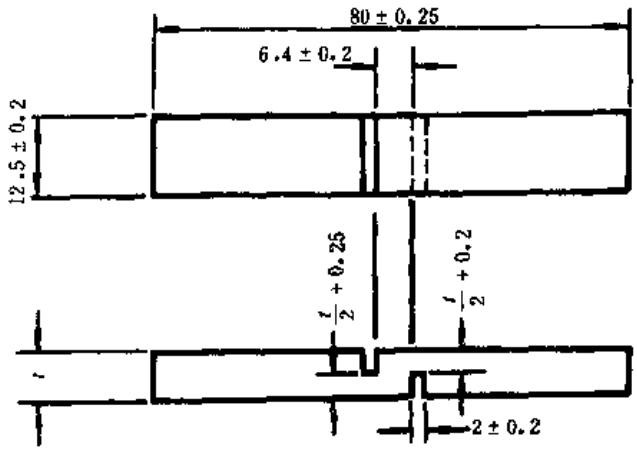


图 6-16 压缩层间剪切试样（尺寸单位：mm）

（三）纤维界面剪切强度试验

纤维界面的剪切强度是短纤维复合材料的一个重要参数，是确定纤维最小长度、临界长度的主要参数。但是，纤维与基体界面强度是一个复杂问题，与界面上粘结的完善程度、有无微裂纹和气泡、有无残余应力等许多因素有关，而且离散性大，难于精确测定。

如图 6-17 为纤维界面强度试验示意图。当纤维从基体中拔出时，其界面强度

$$\tau = P_{max}/(\pi dl) \tag{6-25}$$

式中：τ——界面剪切强度；

d——纤维直径；

l——纤维埋置长度。

由图 6-17 可见，纤维界面剪切强度试验的原理十分简单，但要取得理想的实验结果却不那么容易。当 l 过大，纤维可能拉断而不是从基体中拔出。另外，由于基体中和界面上，剪应力沿长度 l 分布是不均匀的，因此所测得的是基体中或界面上较低的那个剪切强度，而且是整个破坏表面的平均剪切强度。在拔出的前提下，l 越大，在界面上的剪切应力和正应力（垂直于界面）都分布得越不均匀。定性地说，破坏是由最大应力控制的，从局部破坏扩大到全部破坏，因此测得的平均界面强度在一定程度上有所改进。但 l 取得过小，可能产生新的问题，如 P_{max} 太小，界面缺陷的干扰增大，τ_s 离散性增大，试验的可重复性减少。

四、弯曲性能测试

弯曲试验是一种质量控制和材料规范性试验，不作为产生设计数据的试验。它可用于测定单向复合材料、短纤维复合材料、基体等的弯曲模量和弯曲强度，但解释多向层合板的弯曲强度和弯曲模量则较复杂。

（一）试件制作及加载速度

弯曲性能试验通常采用简支梁三点弯曲试验实现。试样几何形状为矩形板条，见图 6-18。

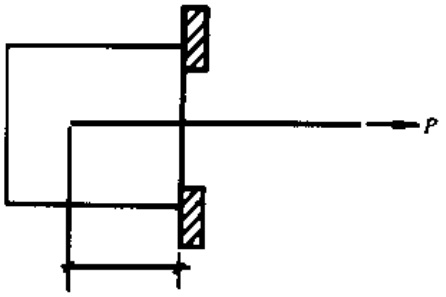


图 6-17　纤维界面强度试验示意图

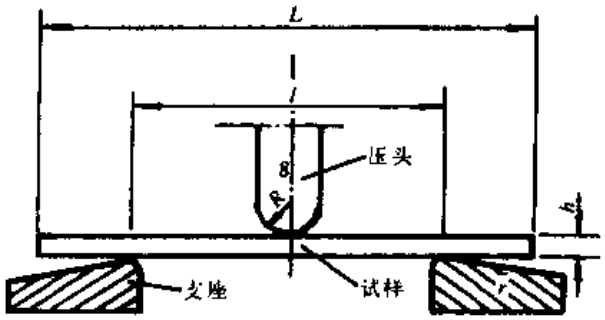


图 6-18　弯曲试验装置

试样跨厚比的选择（确定）应考虑试样弯曲破坏时，拉伸破坏或压缩破坏发生在层间剪切破坏之前；剪切应力引起的挠度和弯曲应力引起的挠度相比可以忽略不计；弯曲强度和弯曲弹性模量测试尽可能统一在一个试样上进行。推荐弯曲试样的跨厚比（l/h）为 16、32 和 40。

弯曲试验时，加载速度 V 是指加载压头的移动速度 df/dt。

$$V=\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}=\frac{l^2}{6h}\cdot\frac{d\varepsilon_{max}}{\mathrm{d}t}=\frac{l^2}{6h}(1\sim 2)\%/\mathrm{min} \tag{6-26}$$

可见，加载速度 V 与跨厚比成正比。当 $l/h=30\sim40$ 时，$V=3\sim10\mathrm{mm/min}$。

（二）试验注意事项

在弯曲试验中，容易产生问题的地方是支点间距和大变形的破坏应力。

复合材料大多为叠层材料，因为它的层间剪切强度低，所以就存在一个支点距离的问题，要使之不产生层间剪切破坏的弯曲破坏必须满足以下条件：

三点弯曲试验时

$$l/h>\sigma_b/2\tau_s \tag{6-27}$$

四点弯曲试验时

$$l/h>\sigma_b/4\tau_s \tag{6-28}$$

式中 σ_b 为弯曲强度，τ_s 为剪切强度。对于单向增强的材料更要引起注意。

在弯曲强度大、挠度大的情况下，荷载挠度曲线为非线性的，这时的水平反作用力就不可忽视了，仍然采用小变形理论来计算，误差就变大了。因反作用力方向的倾斜及水平力等的影响，必须考虑相对于中点中心轴的弯距的影响，特别是对于在支点间距大且挠度大的情况下所破坏的试样，此时弯曲应力计算公式见式（6-31）至式（6-36）。

考虑到以上这些问题，在没有剪切变形影响时，要使 l/h 大些；在没有大的变形效应时，就要使 l/h 小些。要选择能满足以上两点的最佳值进行试验。

（三）试验结果计算及分析

1. 破坏弯曲应力 σ_b，最大弯曲应力 σ_{max}，极限变形弯曲应力 σ_s 可按下式进行计算：

对三点弯曲试验：

$$\sigma=3Pl/2bh^2 \tag{6-29}$$

对四点弯曲试验：

$$\sigma=Pl/bh^2 \tag{6-30}$$

在上述两式中，P 为破坏荷载、最大荷载、极限变形时的荷载（N）；l 为支点间距（mm）；b

为试件宽度（mm）；h 为试件厚度（mm），σ 为相应荷载下的应力 σ_b、σ_{mor}、σ_r 等。

2. 当弯曲强度大，挠度大时，考虑到因有限变形效应和反力方向变化引起的几何非线性的影响，其弯曲应力要采用下式准确计算：

三点弯曲试验时：

$$\sigma_{max}=\frac{3P_{max}l}{2bh^2}(1+\frac{\alpha\delta^2}{l^2}) \tag{6-31}$$

在 ISO 标准中 $\alpha=4$，在 ASTM 标准中 $\alpha=6$，应引起注意。

四点弯曲试验：

$$\sigma_{max}=\frac{P_{max}l}{bh^2}[1+\frac{4644}{529}(\frac{\delta^2}{l})-\frac{162}{23}(\frac{b}{l})(\frac{\delta}{l})] \tag{6-32}$$

在式（6-31）和式（6-32）中 δ 为两支点的变形挠度（mm）。

3. 除大挠度和水平方向作用力的影响外，考虑到支点曲率半径及摩擦的影响，宜用以下的修正公式计算其应力。

三点弯曲试验中：

拉伸一侧的应力

$$\sigma_{max}=\frac{3P_{max}l}{2bh^2}[1+6(\frac{\delta}{l})^2-\frac{h\delta}{l^2}-6\frac{R\delta}{l^2}-\mu(\frac{2\delta}{l}-\frac{4h}{3l})] \tag{6-33}$$

压缩一侧的应力

$$\sigma_{max}=\frac{3P_{max}l}{2bh^2}[1+6(\frac{\delta}{l})^2-\frac{2h\delta}{l^2}-\frac{6R\delta}{l^2}-\mu(2\frac{\delta}{l}-\frac{2h}{3l})] \tag{6-34}$$

四点弯曲试验中：

拉伸一侧的应力

$$\sigma_{max}=\frac{P_{max}l}{bh^2}[1+\frac{4644}{529}(\frac{\delta}{l})^2-\frac{180}{23}-\frac{h\delta}{l^2}-\frac{324}{23}\cdot\frac{R\delta}{l^2}-\mu(\frac{78}{23}\cdot\frac{\delta}{l}-\frac{h}{l})] \tag{6-35}$$

压缩一侧的应力

$$\sigma_{max}=\frac{P_{max}l}{bh^2}[1+\frac{4644}{529}(\frac{\delta}{l})^2-\frac{144}{23}\cdot\frac{h\delta}{l^2}-\frac{324}{23}\cdot\frac{R\delta}{l^2}-\mu(\frac{78}{23}\cdot\frac{\delta}{l}+\frac{h}{l})] \tag{6-36}$$

在式（6-33）至式（6-36）中，R 为支点半径（mm），μ 为摩擦系数。

4. 弯曲弹性模量

弯曲弹性模量测定有两个方法：挠度法和最大应变法。

挠度法：测量试样跨距中点处挠度，则三点弯曲试验时：

$$E_f=\frac{\Delta Pl^3}{4bh^3\Delta f} \tag{6-37}$$

由于剪切应力也引起挠度，所以用挠度法测得的弯曲弹性模量略低于纵向拉伸弹性模量。

最大应变法：测量试样跨距中心处受拉边纵向最大拉伸应变 ϵ_{max}，则

$$E_f=\frac{\Delta 3l^2\Delta P}{2bh^3\Delta\epsilon_{max}} \tag{6-38}$$

五、钢纤维混凝土与钢筋粘结强度试验

（一）试件制作

粘结强度试验采用边长为 150mm 的立方体试件，中心预埋钢筋。钢筋的自由端露出约 5mm，端面应光滑平整；加荷端露出约 250mm。制作试件时钢筋应穿过试模两侧中心洞孔处

于水平状态，洞孔处应设有止水。

试验采用直径为 20mm 的螺纹钢筋，需要时也可采用直径为 20mm 的光圆钢筋。

每组 6 个试件，其制作及养护应符合标准规定。

（二）注意事项

1. 从养护地点取出试件，擦净后检查外观，不得有钢筋松动、歪斜。

2. 试验机加载速度为 200～400N/s。

（三）试验结果计算

按下式计算螺纹钢筋的初始滑移粘结强度：

$$f_{sbi}=\frac{F_{ss0.02}}{A} \tag{6-39}$$

式中：f_{sbi}——钢筋初始滑移时的粘结强度（MPa）；

$F_{ss0.02}$——钢筋自由端滑移量为 0.02mm 时的荷载（N）；

A——埋入钢纤维混凝土中的钢筋表面积（mm）。

$$A=\pi d_s^d l_{s.cm} \tag{6-40}$$

式中：d_s^d——钢筋的计算直径（mm）；

$l_{s.cm}$——钢筋埋入长度（mm）。

接下式计算螺纹钢筋的极限粘结强度和光圆钢筋的粘结强度

$$f_{sbu}=\frac{F_{max}}{A} \tag{6-41}$$

式中：f_{sbu}——钢筋与钢纤维混凝土的极限粘结强度（MPa）；

F_{max}——拔出试验的最大荷载（N）。

取 6 个试件测值的算术平均值作为该组试件的粘结强度值。若试样最大值或最小值或最大和最小两值与中间 4 个测值的平均值差大于中间平均值的 15%，则取中间 4 个测值的平均值作为该试样的粘结强度值。

六、土工膜的渗透特性

使用土工膜的目的在于防渗。它可以阻挡水、水汽、气体及有害物质的渗透。由于使用条件不同，引起渗流的原因不同，所以各类土工膜渗透试验的仪器设备和方法也不相同。本节主要介绍在水压力作用下土工膜的渗透试验，并简单地介绍水汽的渗透试验。

（一）水压力作用下的渗透试验

土工膜在水压力作用下的渗透试验，目前国内外尚无成熟的和较为统一的试验方法。主要参考土工试验中的有关方法和仪器设备，并结合土工膜的特点进行。图 6-19 为试验容器示意图。应用土工试验所用的南-55 型渗透容器可进行厚度 0.2mm 到 4mm 土工膜，水压力从 10kPa 到 500kPa 的渗透试验。

试样数量建议为 5 件，取 5 次试验的平均值。

土工膜的垂直渗透系数和透水率计算公式见式（6-42）与式（6-43）。

$$K_n=\frac{V}{i}=\frac{V\delta}{\Delta h}=\frac{\theta\delta}{At\Delta h} \tag{6-42}$$

应用此渗透系数时应注意两个问题：

1. 土工膜的厚度 δ 随法向压力而变化，其测量误差将影响水力梯度 i 及渗透系数 K_n 的精度。

2. 上述达西定律仅适用于层流状态。实际上当水力坡降大于某一数值后，流态将由层流转变为紊流，达西定律不再适用。

为避免厚度测量引起的误差，土工织物的透水性可采用透水率来表示。透水率是水头差等于 1 时的渗透流速，即为单位时间、单位水头、单位面积流过土工膜的水量，可表示为

$$\Psi = \frac{V}{\Delta h} \text{ 或 } \Psi = \frac{\theta}{\Delta h \cdot At} \qquad (6\text{-}43)$$

式中：K_n——渗透系数（cm/s）；

Ψ——透水率（l/s）；

θ——t 时间的流量（cm）；

Δh——水头差（cm）；

t——时间（s）；

A——面积（cm^2）。

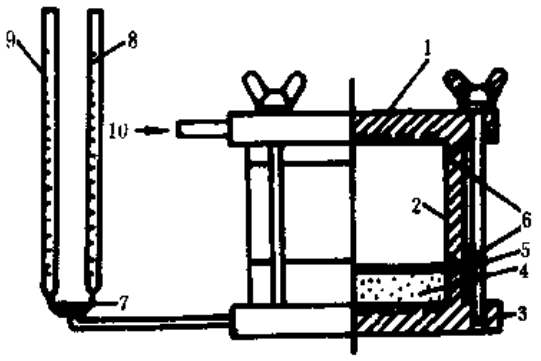


图 6-19 渗透容器

1-上盖；2-套筒；3-下盖；4-透水石或多孔透水板；5-土工膜；6-橡皮圈；7-三通阀；8-小量管；9-大量管；10-进水管

（二）水汽渗透试验

水汽渗透试验（WVT）是在试样两侧保持一定的蒸汽压差的条件下，测量透过试样的蒸气量，用以评价土工膜的渗透特性。

Lord 和 Koerner 曾按照美国 ASTME-96-66 关于片状材料标准试验的规定，进行了土工膜渗透性的试验，其方法为：用一个铝制的杯，内部充水，用土工膜把杯口密封起来，杯内的相对湿度为 100%，杯外的相对湿度要维持一个常量（20%或 50%），经过一定时间（一般 3～30 天），量测杯内水量的损失，从而计算单位面积、单位时间水蒸气透过薄膜的质量，称为输汽量（Water Vapor Tranmission，用 WVT 表示）。

七、土工织物、土工膜的 CBR 顶破试验

本试验模拟粗粒石料对土工织物或土工膜的顶破作用。它利用土工试验中常用的 CBR 试验设备，见图 6-20，操作简便易行，是目前应用较多的顶破试验方法。

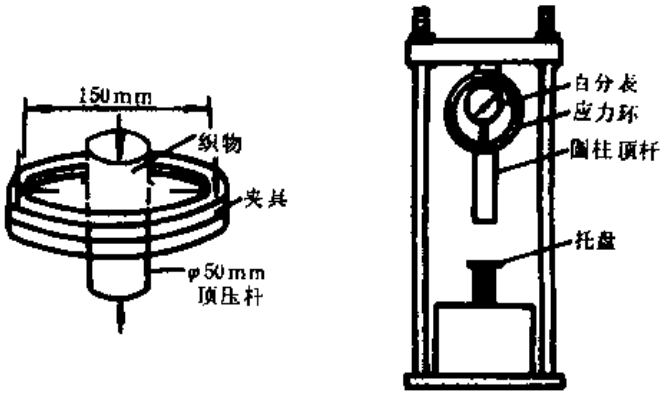


图 6-20 CBR 顶破试验

将织物试样固定在直径为 150mm 的 CBR 圆筒顶部，然后把直径为 50mm 的标准圆柱活塞以 60mm/min 的速率顶压试样直到破坏。记录量力环中百分表的读数，并换算为力，即为顶破强度，单位为 N。

试样尺寸为 230mm 的圆形，数量不少于 10 块。

表 6-7 为国外有关 CBR 顶破试验的标准及其参数，可供参考。

国外有关 CBR 顶破试验的标准及其参数 表 6-7

参数 / 标准	夹具内径 (mm)	顶杆直径 (mm)	顶进速度 (mm/min)	试样数 (块)	单位	说明
瑞士建议 $ISO/TC_{38}/SC_2/N_{29}$	152	50	60	10	N	杆端平头
挪威 NBR	150	50	130	10	N/%	杆端平头
意大利 UNITEX UN_{18279}	150	50	60	5	N	杆端平头
原联邦德国 DIN_{54307}	150	50	60	10	N%	杆端平头
原联邦德国 FGSV	150	50	60	10	N	——
瑞士 VSS SN_{640550}	152	50	60	1	N	——
南非 $SABS_{5.6}$/Draft	150	50	60	10	N/%	杆端平头

八、疲劳试验

疲劳试验是研究材料在长期交变荷载作用下的特性的试验方法。然而复合材料疲劳试验比较复杂，非均质各向异性材料、层合结构特点等给试验技术带来许多新的课题。到目前为止，仅拉一拉疲劳试验建立了测试标准。因此，本节仅介绍复合材料疲劳试验技术要点。

1. 疲劳试验的分类

复合材料疲劳性能试验可以分为：荷载主要由纤维承担，层间与界面承力较小的情况（如轴向荷载疲劳试验和弯曲疲劳试验等）；层间与界面承力较大的情况（如短梁层间剪切疲劳试验、扭转疲劳试验和偏轴荷载疲劳试验等）。当然，试验时这两类情况注意的问题是不同的。

按试验方法可以分为：由荷载控制的应力疲劳试验；由应变或变形控制的应变疲劳试验。对应变疲劳试验，由于试验过程中复合材料刚度（模量）的下降，试样所受应力也下降。

有时还要进行复合材料的环境（温度、湿度）疲劳试验。

2. 复合材料疲劳试验设备

复合材料疲劳试验通常采用电液伺服式材料疲劳试验机进行试验。这种试验机荷载读数准确、误差小。工作频率选用 15Hz，或实际工作频率。若采用共振式疲劳试验机，工作频率一般控制在 60Hz 为宜。

复合材料疲劳试验其它辅助设备还有环境控制箱、工作状态测量设备（动态参数测量和记录设备）和损伤探测设备（声发射仪、超声波损伤检测仪、X 射线仪、温度测量仪等）等。

3. 复合材料疲劳试样设计

试样几何形状是影响复合材料疲劳性能试验数据的主要因素。试样设计应综合考虑试样几何形状、纤维品种、增强方式等之间的关系。合理的试样几何形状的确定，应以试样受力接近实际情况为准，而不应以试验数据高低为准。试样边缘通常做为单独因素加以考虑。因为纤维在试样边缘中断，较高层间应力往往成为引起疲劳破坏的因素，试样夹持端通常采用加强片补强，以保持加载均匀，并防止局部挤压破坏。目前，疲劳试样和静强度试样一样，也

多采用矩形直条试样。对压缩疲劳试样，为了防止或避免出现失稳现象，通常采用抗失稳装置，或大大缩短工作段长度到 10～20mm。

4. 复合材料疲劳破坏准则

疲劳破坏准则的确定是复合材料疲劳试验中最关键、最困难的一个问题。现有的大量的复合材料是仿效金属材料以断裂作为疲劳破坏准则。实际上复合材料疲劳破坏过程，由于损伤的起始和扩展，表现出弹性模量和强度特性的下降，由此提出以刚度（弹性模量）下降 5%～10%或频率变化 1～2Hz 来确定破坏准则。随着无损检测技术的发展，以损伤范围大小确定疲劳破坏的准则成为可能。如以分层面积百分比（$A_D/A_D\%$、分层面积 A_D、名义面积 A_0）和纤维间界开裂的百分比（$N_{CR}/N_{CR\,BAT}\%$、为单位长度纤维间界开裂数、$N_{CR\,BAT}$为单位长度纤维间界开裂饱和数）作为疲劳破坏准则。对玻璃纤维增强聚合物基复合材料，有人提出以试样表面温升达到 40℃作为试样疲劳破坏准则。当然，试验者根据试验目的和试验设备条件确定自己切实可行的疲劳破坏定义也是允许的。

第四节　耐久性试验

道路工程中常见复合材料耐久性试验包括抗冻性、耐磨性和耐久性试验[71]等。

一、钢纤维混凝土的抗冻性试验

（一）慢冻法

本方法适用于测定钢纤维混凝土的抗冻等级，即立方体试件相对抗压强度不低于 75%时的气冻水融最大循环次数。

1. 试验要求

钢纤维长度不大于 40mm 时，采用边长为 100mm 的立方体试件；钢纤维长度大于 40mm 时，采用边长为 150mm 的立方体试件。试件的制作和养护应符合有关标准。

2. 试验步骤

(1) 冻融试验应用 28d 龄期的试件。试验前应将试件放入 15℃～20℃的水中浸泡 4d，水深应没过试件顶面 20mm。对比试件仍应置于标准养护室内。

(2) 将浸泡完毕的试件放入框篮，置于冷冻箱内。

(3)试件冻结后，应立即取出放入 15℃～20℃的水槽中融化，水深应没过试件顶面 20mm。融化时间不得少于 4h。融化完毕即为一次冻融循环。

(4) 达到规定检验强度的循环次数时，取出冻融试件和对比试件各 1 组，测定其抗压强度。

(5) 冻融至设计循环次数或试件破坏时停止试验。

3. 试验结果计算

钢纤维混凝土试件冻融循环后的相对强度按下式计算：

$$\Psi_{fc,cm,n}=\frac{f_{fc,cu,n}}{f_{fc,cu,0}}\times 100\% \tag{6-44}$$

式中：$\Psi_{fc,cm,n}$——n 次冻融循环后的相对抗压强度（%）；

$f_{fc,cu,n}$——n 次冻融循环后 3 个冻融试件抗压强度的算术平均值（MPa）；

$f_{fc,cu,0}$——3 个对比试件抗压强度的算术平均值（MPa）。

钢纤维混凝土的抗冻等级应以相对抗压强度不低于75%时的最大循环次数表示。

（二）快冻法

本方法适用于测定钢纤维混凝土的抗冻能力，即棱柱体试件相对动弹性模量不低于60%时的水中快速冻融最大循环次数。

1. 试验要求

冻融试件及测温试件均采用100mm×100mm×400mm的棱柱体。冻融试件每组3个，可连续使用。测温试件应采用抗冻性能高于冻融试件的钢纤维混凝土制作，中心埋设热电偶。

试件的制作及养护方法应符合有关标准。

2. 试验步骤

（1）应用28d龄期的试件。试验前应将冻融试件和测温试件放入15℃～20℃的水中浸泡4d，水深应没过试件顶面20mm。

（2）将浸泡完毕的试件擦干，测定其横向基频的初始值。测试方法及步骤应符合有关规定。

（3）测完初始值后，将试件放入试件盒内。在整个试验过程中，盒内水面应高出试件顶面5mm。

（4）将试件放入冻融箱，测温试件应放在冻融箱的中心位置，开始冻融试验。

（5）每隔25次循环测量一次横向基频。测量前应清洗试件表面的浮渣并擦干。测定后，应立即将试件掉头重新放入试件盒。测量应迅速，以防水份损失。

（6）部分试件停冻取出时，应另用试件补充空位，以保证冷液的温度均衡稳定。

（7）冻融至设计循环次数或试件破坏时，停止试验。

3. 试验结果计算

钢纤维混凝土的抗冻能力应以相对动弹性模量不低于60%时的水中快速冻融最大循环次数表示。钢纤维混凝土试件的相对动弹性模量按下式计算

$$\zeta_{fc,n}=\frac{f_{fc,n}}{f_{fc,0}^2}\times 100\% \tag{6-45}$$

式中：$\zeta_{fc,n}$——n次冻融循环后的相对动弹性模量（%）；

$f_{fc,n}$——n次冻融循环后3个试件横向基频的算术平均值（Hz）；

$f_{fc,0}$——冻融循环前3个试件初始横向基频的算术平均值（Hz）。

二、耐磨性试验

磨损是因为摩擦、研磨、侵蚀等机械作用，使材料从其表面逐渐脱落的现象。磨损试验的方法很多，根据不同种类的复合材料可以套用相应或相类似的标准试验方法。ASTM中有磨损轮法和研磨材料法。以下简单介绍磨损轮法。

1. 试验设备及试样要求

磨损轮法的试验机，如图6-21所示，把一对磨损轮在规定的荷载下压紧在旋转的试件上，并且用这对磨损轮来摩擦试件。安装试件的旋转圆板的转速为60±2r/min，荷载为250g、500g、1000g三种。当吸入孔与试件的距离为3mm时，吸入磨损粉尘的风量规定为0.5±0.1m/min。

在磨损轮中所使用的研磨材料为绿色的碳化硅，粒度150号，磨损轮形状尺寸如图6-22所示。

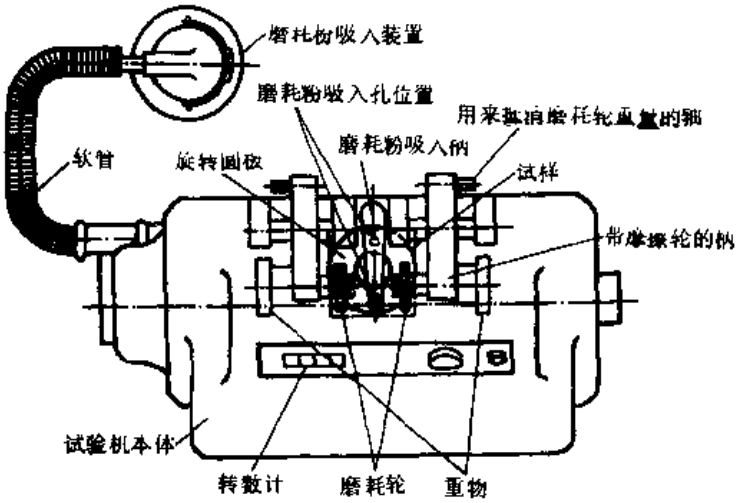


图 6-21　泰伯尔式磨损试验机

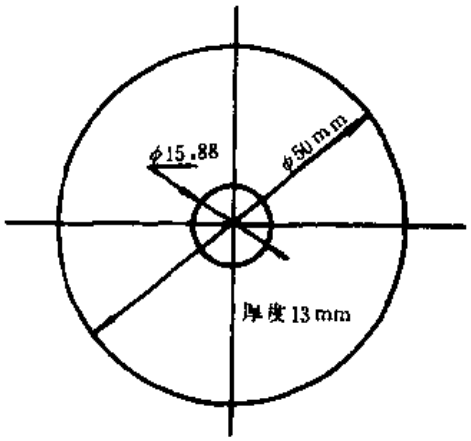


图 6-22　磨损轮尺寸

试验机及磨损轮的综合性能是当用标准试件试验时，磨损为 120±25mg 时为正常状况。

试件尺寸为直径 120mm、厚 1～5mm 的圆盘或做成对试验没有妨碍的形状、大小大致相同的试件。在试件的中心钻一个直径 6.5mm 的孔。但当试件厚度小于 1mm 或大于 5mm 时，其试件尺寸应作调整。试件数目不小于 3 件。试件的质量应准确地测定到 1mg。

2. 试验步骤

试验开始时，先把试件装在试验机的旋转板上，把磨损轮的外缘用金钢石修整器修整好，装到磨损轮的安装轴上并用螺钉固定好，将装上所规定的一组砝码，然后在试件上慢慢放磨损粉尘吸入柄，把试件与磨损粉尘吸入孔的距离用规定的缝隙测量仪调整到了 3mm。将磨损轮慢慢地放到试件上，启动试验机，对一个试件连续研磨到规定的转数（如 1000 转等）。

从试验机上取下试件，用洗净的布除去磨损粉尘等杂质，准确称重至 1mg，与试件试验前的质量比较求出其磨损量。

参考书目录

1. (美) L. H 范弗莱克著. 材料科学与材料工程基础. 夏宗宁译. 北京：机械工业出版社，1984.
2. 郑明新主编. 工程材料. 北京：清华大学出版社，1991.
3. 陈　瑞，王　建主编. 基础材料与新材料. 天津：天津大学出版社，1994.
4. 师昌绪主编. 新型材料与材料科学. 北京：科学出版社，1988.
5. 王震鸣编著. 复合材料力学. 北京：机械工业出版社，1991.
6. Jones, R. M., Mechanics of Composite Materials, Scripta Book Co Washington, D. C., 1975.
7. 沈为. 树脂基复合材料的损伤与损伤力学（复合材料力学进展）北京：北京大学出版社，1989.
8. Xue, Y. D. Analysis of Damage Initiation in Composite Materials, proc Iccm VI/ECCM 2, 3 (1987), 117-122.
9. 杨光松编著. 损伤力学与复合材料损伤. 北京：国防工业出版社，1995.
10. Rosen, B. W., Tensile Failure of Fibrous Composites, AI AAJ., 12 (1964).
11. Rosen, B. W., Mechanics of Composite Strengthening Fiber Composite Materials, Amer. Soc. of Metats. Metal Park Ohio, Chaper 3, 1965.
12. 高丹盈，刘建秀著. 钢纤维混凝土基本理论. 北京：科学技术出版社，1994.
13. Chon. C. T.; C. T. Sun
    Stress Distributions along a short Fibre in Fibre Reinforced Plastics J. Materials Sci. 15, (1980).
14. 顾震隆编著. 短纤维复合材料力学. 北京：国防工业出版社，1987.
15. Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proc. Roy. Soc. A241 (1957) 376.
16. Eshelby, J. D.: The elastic field outside and ellipsoidal inclusion, Proc Roy. Soc., A252 (1959) 561.
17. Mori, T., Tanaka, K.: Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, Acta Metall, 21 (1973) 571.
18. 蔡四维著. 短纤维复合材料理论与应用. 北京：人民交通出版社，1994.
19. 张志民主编. 复合材料结构力学. 北京：航天航空大学出版社，1993.
20. 罗祖道，李思简编著. 各向异性材料力学. 上海：上海交通大学出版社，1994.
21. 张双寅，刘济庆，于晓霞，蔡良武. 复合材料结构的力学性能. 北京：北京理工大学出版社，1992.
22. 李灏著. 损伤力学基础. 济南：山东科学技术出版社，1992.
23. 雍本编著. 特种混凝土设计与施工. 北京：中国建筑工业出版社，1993.

24. 中国工程建设标准化协会标准：钢纤维混凝土试验方法；钢纤维混凝上结构设计与施工规程．北京：中国计划出版社，1996.
25. 安增利，元飞，张宗军．钢纤维混凝上在104国道上的应用．华东公路，1996.3.
26. 中国建筑科学研究院混凝土研究所主编．混凝土实用手册．北京：中国建筑工业出版社，1987.
27. 刘宗耀等编．土工合成材料工程应用手册．中国建筑工业出版社，1994.
28. 刘宗耀．近代土工合成材料的发展．岩土工程学报，1988，10（2）．
29. 熊有言．土工格栅在道路工程中的应用．国外公路，1995，15（1）．
30. 奚静．土工格栅在柔性路面积结构中的应用．公路，1996.12.
31. 汤宝润，周国旺．柔性复合材料土工布的流变特性研究．力学与实践，1992.14（2）．
32. K.D. 艾根布罗德等．用土工合成材料作衬垫或保护层的边坡设计摩擦值的确定．Candian Geotechincal Journal，1987.24（4）．
33. 周群．土工织物锚抗拔承载力试验研究．土木工程学报，1991.24（1）．
34. 周志刚、郑健龙、张起森、高燕希．Netlon土工格栅与土界面性能的研究．长沙交通学院学报，1998.3.
35. 刘才良，舒世馨．岩土工程学报。1987.9（5）．
36. 陈祥龙．用于松软土基道路结构中的合成织物材料．华东公路，1985.6.
37. 熊有言．土工织物在我国道路工程中的应用．公路，1990.11.
38. 邓学钧，杨军．土工织物在路基路面结构中的应用．华东公路，1993.6.
39. 吴景海，陈环．土工膜防渗层渗漏量的计算．岩土工程学报，1995.17（2）．
40. 陈永福，张起森，高燕希．Netlon土工网对土体抗压中的加固作用．长沙交通学院学报，1995.11（4）．
41. 周志刚，郑健龙，高燕希．土工格栅加固试件抗压强度的极限平衡分析．长沙交通学院学报，1997.13（3）．
42. 高燕希，陈永福，张起森．Netlon土工网在公路桥台跳车处理中的室内试验研究与分析．长沙交通学院学报，1995.11（3）．
43. 喻泽红，韩理安．土工网处理桥头差异沉降的有限元分析．岩土工程学报，1996.18（6）
44. 朱诗鳌，蔡笃文．一座具有加筋土桥墩与桥台的公路桥．全国第四届土工合成材料学术会议论文集，1996.
45. 公路加筋土工程设计规范（JTJ015-91）．
46. Guidelines for the design & construction of reinforced soil retaining walls using' Tensar' geogrids. Netlon Limited. UK. 1984.
47. 梁波，孙遇祺．加筋土模型试验中的拉力破坏研究．岩土工程学报，1995.17（2）．
48. 邓延勋．土工网格在风化岩石边坡防护中的应用．路基工程，1995.2.
49. 俞仲泉，李少青．土工织物加固堤基的离心模型试验．岩土工程学报，1989.11（1）．
50. 赵九斋，龙国英，徐啸海，杨灿文．土工织物加固路基和天然路基对称破坏及其分析．岩土工程学报，1991.13（2）．
51. 陈惠民．应用土工格栅处理软土路基效果分析．华东公路，1996.1.
52. 陈永福，周应英，陈晔，张起森．土工网在处理吹填粉细砂软基中的应用．岩土工程学报，

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.

1996.18（2）.
53. 周志刚，张起森，郑健龙．土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析．土木工程学报，1997.30（4）.
54. 杨有海．加筋碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1993.15（5）.
55. 周志刚，张起森．土工格栅碎石桩的承载力分析．岩土工程学报，1997.19（1）.
56. Designing for Soil Reinforcement. Exxon Chemical Geopolymers Ltd. 1989.
57. A Geotextiles Dosign Guide. Don & Low Ltd. Scotland. 1988.
58. 孙恒恺．采用土工布控制反射裂缝．华东公路，1987.3.
59. 凌旭初．土工织物控制沥青路面反射裂缝的试验研究．华东公路，1990.3.
60. 周瑞忠．土工织物阻滞路面裂缝扩展的机理研究和数值方法．中国公路学报，1995.8.
61. 周志刚，张起森．结构层组合对路面裂缝扩展的影响．中国公路学报，1997.10（2）.
62. 周汉东，周爱国，谢佩福，罗旗帜．土工布在桥头防冲刷工程中的应用．公路，1996.6.
63. 同济大学道路与交通工程研究所等编．半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1991.
64. 刘其军，龚仁贵，周昌栋，陈洪略．水泥沥青混凝土路面的研究与应用．中南公路工程，1992.6.
65.（苏）C.H. 波普钦科著．冷沥青防水慕柳译．北京：中国建筑工业出版社，1980.
66.（日）小林一辅著．纤维补强混凝土邹崇富译．北京：中国铁道出版社，1985.
67. 严家伋编著．道路建筑材料．北京：人民交通出版社，1996.
68. 张登良主编．沥青与沥青混合料．北京：人民交通出版社．1993.
69. 沈金安，李舜范．改性沥青 SMA 沥青混合料及其在北京地区的应用．中国公路学报，1996.2.
70. 陶婉蓉等编著．高性能聚合物基复合材料．上海：上海科技出版社，1989.
71. 姚佳良，肖桂彰．石膏基层状复合饰面板的研究．房材与应用，1998.6.