

钢纤维混凝土基本理论

(河南省自然科学基金资助项目)

高丹盈 刘建秀 著

科学技术文献出版社

钢纤维混凝土基本理论

(河南省自然科学基金资助项目)

高丹盈 刘建秀 著

科学技术文献出版社

(京)新登字130号

钢纤维混凝土是近年来在国内外开展的一种新型复合材料研究项目,本书是有关这方面研究成果的综合性专著。

全书分两部分,共12章。1~8章为第一部分,包括纤维增强复合材料的基本理论,钢纤维在混凝土中的分布与取向,钢纤维混凝土的界面性能、增强机理及基本力学性能的试验与计算方法;9~12章为第二部分,系统地论述了钢纤维混凝土一维受力应力应变关系的测试技术以及其相互关系的解析表达式,钢纤维混凝土结构设计方法及钢筋钢纤维混凝土构件性能的分析与计算方法。

本书可作为高等院校土建、水利等专业的研究生教材或教学参考书,亦可供土建、水利工程技术人員阅读。

图书在版编目(CIP)数据

钢纤维混凝土基本理论/高丹盈,刘建秀著.——北京:科学技术文献出版社,1994

ISBN 7-5023-2378-3

I.钢… II.①高… ②刘… III.金属纤维-纤维增强混凝土-理论 IV.TU528.572

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第07684号

科学技术文献出版社出版

(北京复兴路15号 邮政编码 100038)

通县建新印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 16.75印张 430千字

1994年12月第1版 1994年12月第1次印刷

印数:1-1300册

科技新书目:336—094

定价:19.50元

前 言

钢纤维混凝土是在普通混凝土中掺入乱向分布的短钢纤维所形成的一种新型的多相复合材料。它不仅具有普通混凝土的优良特性,同时显著地改善了混凝土的抗拉性能、抗弯性能、抗冲击性能、抗疲劳性能,具有较好的延性及控制裂缝的能力。目前已广泛地应用于隧洞衬砌和护坡,路面、桥面和机场跑道,桥梁结构和铁路轨枕,水工建筑物,港口与海洋工程,建筑结构和制品以及耐火工程等实际工程中。随着实际应用的不断深入,对钢纤维混凝土基本理论进行系统的研究就显得尤为重要。现将作者近年来在钢纤维混凝土方面的研究成果、体会以及收集到的有关资料,写成此书。旨在为这一领域的发展尽一份微薄之力,以期能起到抛砖引玉和推波助澜的作用。

作者认为,由于钢纤维的掺入,使钢纤维混凝土的破坏和纤维的增强机理以及其配筋构件的受力变形性能的复杂性不仅表现为影响其受力变形性能有诸多因素,而且还表现在用公式描述这些影响因素的困难性。钢纤维混凝土是在普通混凝土基体中加入钢纤维所形成的复合材料,因此反映钢纤维混凝土性能的计算方法和公式不仅要考虑混凝土基体性能,也应该考虑钢纤维阻裂增强的影响。如果在这些计算方法和公式中不计及钢纤维的作用,计算方法和公式应该反映混凝土结构的力学性能,也就是说,混凝土结构可作为钢纤维混凝土结构的一种特殊情况,或者称其为钢纤维混凝土结构的边界条件。但由于混凝土及其配筋构件性能的研究还不十分成熟,很多问题尚待继续完善和解决,在这种基础上研究钢纤维混凝土及其配筋构件的力学性能,建立满足混凝土结构边界条件的计算方法和公式就有相当大的难度。正是基于这些原因,本书在对钢纤维混凝土及其配筋构件受

目 录

第一章 纤维增强复合材料导论	(1)
§ 1-1 复合材料的定义与分类.....	(1)
§ 1-2 复合材料中的力学问题.....	(5)
§ 1-3 钢纤维混凝土复合材料.....	(9)
第二章 各向同性和异性弹性体的本构关系	(27)
§ 2-1 各向同性弹性体的本构关系.....	(27)
§ 2-2 各向异性弹性体的本构关系.....	(34)
第三章 长纤维复合材料增强理论	(47)
§ 3-1 长纤维增强复合材料的本构方程.....	(47)
§ 3-2 长纤维增强复合材料的强度理论.....	(57)
§ 3-3 长纤维增强复合材料工程常数及强度的细观力学分析.....	(67)
第四章 短纤维复合材料增强理论	(89)
§ 4-1 应力传递理论.....	(89)
§ 4-2 单向短纤维复合材料的弹性模量和强度.....	(104)
§ 4-3 乱向短纤维复合材料的弹性模量和强度.....	(108)
第五章 混凝土中纤维形态的分析与计算方法	(110)
§ 5-1 钢纤维分布和取向及主要影响因素.....	(110)
§ 5-2 钢纤维有效系数的实测法.....	(116)
§ 5-3 钢纤维方向系数的计算方法.....	(117)
§ 5-4 钢纤维有效系数的计算方法.....	(136)
§ 5-5 纤维形态计算方法的讨论与建议.....	(145)
第六章 钢纤维混凝土的界面性能	(153)
§ 6-1 混凝土的内部结构和界面性能.....	(153)
§ 6-2 钢纤维与混凝土的粘结力试验及界面性能.....	(182)
§ 6-3 钢纤维混凝土拔拉问题的理论分析方法.....	(208)
§ 6-4 混凝土开裂后钢纤维拔拉问题的理论分析方法.....	(218)

第七章 钢纤维混凝土增强机理	(226)
§ 7-1 混凝土的基本特性和破坏机理.....	(226)
§ 7-2 分析钢纤维增强机理的基本观点.....	(232)
§ 7-3 钢纤维混凝土增强机理的基本理论.....	(239)
第八章 钢纤维混凝土基本力学性能	(250)
§ 8-1 钢纤维混凝土的抗压性能.....	(251)
§ 8-2 钢纤维混凝土的抗拉性能.....	(260)
§ 8-3 钢纤维混凝土的抗剪性能.....	(267)
§ 8-4 钢纤维混凝土的弯曲性能.....	(274)
§ 8-5 钢纤维混凝土与钢筋的粘结性能.....	(287)
§ 8-6 钢纤维混凝土韧性的计算方法.....	(294)
第九章 钢纤维混凝土单向受力的应力应变关系	(304)
§ 9-1 单向轴压荷载下钢纤维混凝土的应力应变关系.....	(305)
§ 9-2 单向轴拉荷载下钢纤维混凝土的应力应变关系	(340)
第十章 钢纤维混凝土结构设计方法	(374)
§ 10-1 结构设计的要求	(374)
§ 10-2 近似概率设计法	(392)
§ 10-3 近似概率设计法的实用表达式	(404)
第十一章 钢筋钢纤维混凝土构件正截面性能的分析 与计算	(410)
§ 11-1 钢筋钢纤维混凝土受弯构件的正截面性能	(410)
§ 11-2 正截面强度的计算方法	(419)
§ 11-3 正常使用极限状态验算	(438)
第十二章 钢筋钢纤维混凝土梁斜截面性能的研究	(458)
§ 12-1 剪切破坏的类型和剪力传递的模式	(459)
§ 12-2 影响抗剪强度的主要因素	(468)
§ 12-3 抗剪强度的计算方法	(475)
参考文献	(517)
英文目录	(526)

第一章 纤维增强复合材料导论

复合材料是由两种或多种性能不同材料组成的新材料，其中每一种组成材料称为复合材料的相（材料）或组分。通常，将复合材料中一个比较连续的相称为基体，而被基体包容的相称为增强材料，基体与增强材料的结合面称为界面，这些相或组分虽然在宏观上相互牢固地结合成一个整体，但它们之间既不发生化学反应，也不相互溶解，通常在各组分的界面上可以物理地区分开来。因此，复合材料是一种多相材料。

改变复合材料的相物理（各相材料的物理性质）、相几何（各相材料的几何形状及其分布）可获得各种性能的复合材料，以满足使用要求。因此，复合材料可以满足单一材料所无法达到的性能要求，不但给人们在选择和设计材料时提供了更多的自由度，而且在不断满足由于科技进步对材料提出各种新的技术要求方面也提供了广阔的前景。近年来，随着复合材料与其结构制造工艺的不断改进和完善，市场销量的不断增大，成本逐渐降低，以纤维增强为特征的复合材料在航空、宇航、汽车、造船、建筑、桥梁、车辆、化工设备、医学以及运动器材等方面的应用愈来愈广泛，用量越来越大。不难断言，21世纪将是复合材料时代。

§1-1 复合材料的定义与分类

一、复合材料的定义

复合材料的定义有多个，最简单、最常见的定义是：“复合材料是由两种或两种以上不同材料复合而成的新材料”。根据这个定义，复合材料包括的范围很广，从天然材料到人工材料，从

生物材料到非生物材料都可以列出符合上述定义的材料。在天然材料中，属于生物材料的有木材、竹子、骨骼、肌肉与动物角；属于非生物材料的有岩石与云母等。在人工材料中，混凝土与共晶态金属等都归属于复合材料范畴。

为了缩小复合材料定义所包含的范围，有人提出如下定义：“把两种或更多种不同性能、互不相溶（熔）的原材料人工复合在一起，形成具有特殊性能的新型材料，就是复合材料”。这个定义排除了属于天然材料与生物材料范围的一大批复合材料。

很多学者认为，复合材料与其称为一种材料不如称为一种“结构”。他们定义是：“复合材料是由增强相、基体相与填料构成的亚微观（细观）结构，这些组分材料除界面外没有发生化学反应。”这个定义强调了复合场料的“结构”特性。由于复合材料是一种结构，复合材料力学性能可分为细观力学性能与宏观力学性能两大部分，比单一材料的传统材料力学复杂得多。为准确地描述与表征内容广泛的复合材料系统，必须分不同层次进行，并且必须对不同层次的力学问题，建立不同的力学模型，使用不同的分析手段来解决。

从工程应用的角度定义，复合材料主要是指一种材料以人为的办法均匀地分散在另一种材料之中，以克服单一材料的某种缺陷，并发挥其综合性能。因此，适用于工程结构的复合材料的定义主要包括下列三点内容：

(1) 它包含两种或两种以上物理上不同并可用机械方法分离的材料。

(2) 它可以通过将几种分离的材料混合在一起而制成，混合的方法是，在人为的控制下将一种材料分散到其它材料之中使之达到最佳性能。

(3) 其性能优于各单组分材料，并在某些方面具有独特的性能。

以上给出了几个不同的复合材料定义，在此基础上，为了更

全面、更准确地定义复合材料，现归纳如下：“复合材料是由不同性能、除界面外互不相溶（熔）的增强相、基体与填加剂，通过人工复合工艺制造的具有多相细观结构的有特殊性能的新型材料系统。”这个定义明确限定了在实际工程中的复合材料是人工复合的、多相的、具有细观结构的、性能全新的材料系统。

二、复合材料的分类

复合材料的种类很多，如按增强材料分类可以归纳为纤维增强复合材料，颗粒增强复合材料和薄片增强复合材料，详见图1-1所示。此外，复合材料还可以根据不同的基体材料等进行分类，下面介绍几种其它常见的分类方法。

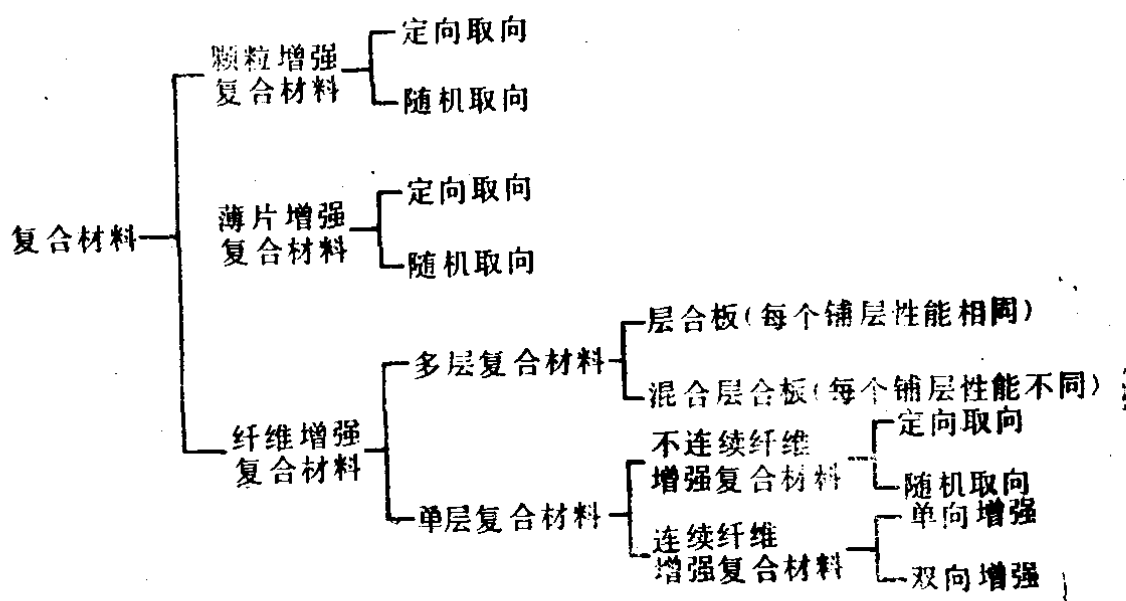


图1-1 复合材料的分类

1. 按材料作用分类

可分为结构复合材料和功能复合材料两大类。前者是制造工程结构可承受外载荷的复合材料；后者（如耐烧蚀材料、无线电波可穿透材料等）则具有各种独特的物理性质，如换能特性、阻尼特性、摩擦特性、导磁或导电等方面的特性。复合材料的隐身性能已引起人们的极大兴趣，美国已研制出第一架隐身复合材料飞机，可以逃避雷达追踪，具有重要的战略意义。

2. 按基体材料分类

可分为非金属基体和金属基体两大类。非金属基体复合材料主要有树脂基复合材料(又称聚合物复合材料)、陶瓷基复合材料和水泥基复合材料。水泥基复合材料是本书的主要研究对象。金属基复合材料目前常用的主要是铝基,如硼增铝基、碳化硅增强铝基等。

3. 按纤维分类

有连续纤维、短纤维与晶须增强复合材料。纤维种类包括钢纤维、玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、聚丙烯纤维、有机纤维(或称芳纶纤维)等,在土木工程中应用较多的是短钢纤维。

4. 按复合材料结构分类

关于材料结构大致可以分为三个层次:第Ⅰ个层次是最基本的结构,就是指任何材料都具有分子结构或晶格点阵结构;第Ⅱ个层次是细观结构,即材料都是由不同相(增强相与基体相)、晶粒或混合物组成;第Ⅲ个层次是宏观结构层次,复合材料常常具有叠层结构,每一层可以由相同的或不同性质的材料构成。从不同的层次结构,可把复合材料分为单层复合材料(包括纤维、颗粒与碎片增强复合材料)、层状复合材料(或称层合板;叠层复合材料)与填充骨架型复合材料(填充泡沫塑料与填充蜂窝复合材料都属于此类)。这些复合材料种类的简明示意图,如图1-2所示。这里需要说明的是,混杂复合材料是指由两种以上纤

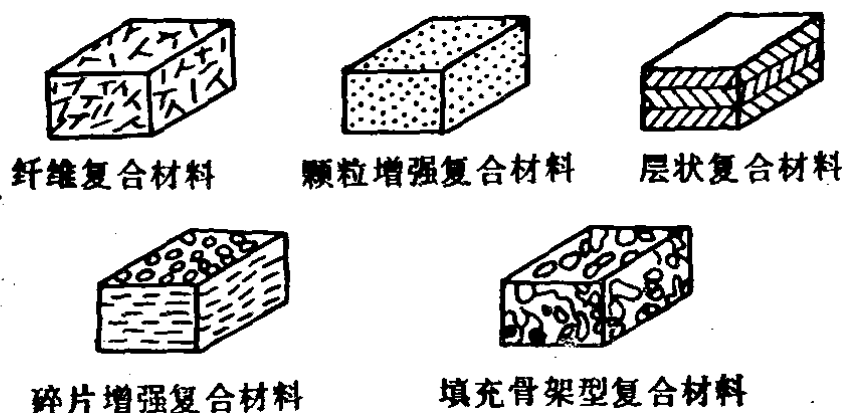


图1-2 各种类型复合材料示意图

维混杂在一起增强基体的复合材料。最常用的是碳与玻璃两种纤维混杂增强环氧复合材料，也有碳与有机纤维混杂的复合材料。在土木工程中的钢纤维和维纶纤维增强水泥混凝土复合材料亦属此类。混杂结构又可分层间混杂与层内混杂两类。层间混杂就是不同层的纤维种类不同，但各层内的纤维只限于一种；层内混杂指各层内的纤维都包括两种不同的纤维。层内混杂又有层内混杂编织与层内混杂平行铺布两种。

§1-2 复合材料中的力学问题

一、复合材料的力学模型

在宏观尺度上，材料的力学性能大致可用如下几种模型来描述，即①均匀各向同性模型；②均匀各向异性模型；③非均匀各向同性模型；④非均匀各向异性模型。

均匀材料模型假定在整个物体内部材料性质是均匀的；各向同性是指在介质内部沿任何方向都具有相同性质。复合材料具有固有的非均匀性和结构复杂性，通常需用如图 1-3 所示的两种观点进行分析：即细（亚微）观力学观点和宏观力学观点。

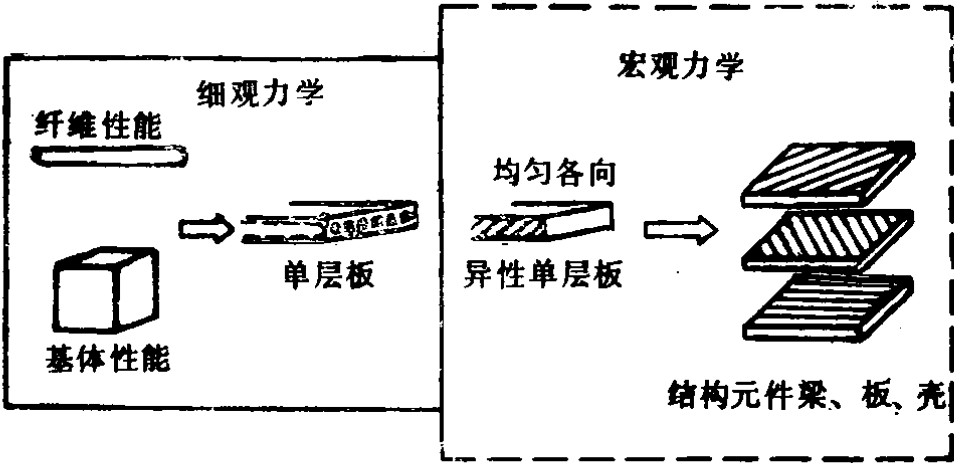


图1-3 分析复合材料的细观力学与宏观力学模型

细观力学观点承认复合材料的组分材料，即纤维与基体为基

本组织单元,而不考虑这些组分材料的内部结构。所以,细观力学承认非均匀性,并在分析中考虑它的效应。为了建立适合于该层次上表征材料响应的方法,通常必须引入一些简化假设。其中最重要的是假设在复合材料中纤维排布是规则的,界面结合是理想的。这样,就可以根据纤维与基体的性能以及它们的体积百分比预测复合材料的平均性能。所得的结果可以作为基本数据用于进行宏观结构性能的分析预测。

宏观力学只承认复合材料的平均性能是唯一重要的参数,而忽略复合材料内部的细观结构效应;承认复合材料具有各向异性,即认为在复合材料内顺纤维方向的性质与垂直纤维方向的性质互不相同。最终状态的复合材料结构元件,例如梁、板与壳等是通过将这些由复合材料组成的单向板以一定的方向和顺序铺叠粘合而成的。这些结构元件可用经典各向异性层合板理论来分析。

一般情况下,对于这些简单的复合材料元件来说,用宏观力学模型分析其变形、振动与弹性稳定问题,可以得到足够满意的结果。然而当研究纤维增强机理以及复合材料的断裂、损伤问题时,其细观非均匀性效应必须予以考虑,针对细观结构特性建立相应的力学模型才能得到有价值的结果。

二、复合材料开发与应用中的力学问题

图 1-4 是国内学者概括的复合材料开发与应用过程中所遇到的各类力学问题。

1. 组分材料的力学性能

要准确预测复合材料的力学性能必须研究组分材料的力学性能,弄清这些材料的强度、刚度、韧性、延伸率等以及它们的统计分布规律。组分材料性能是复合材料性能的基础。

2. 工艺力学问题

制造工艺是确保复合材料质量、降低成本的重要环节。其中包含大量力学问题,固化残余应力问题和树脂流动中的流变学问题是其中的两大难题。加工固化过程中各种参数,如固化温度、压

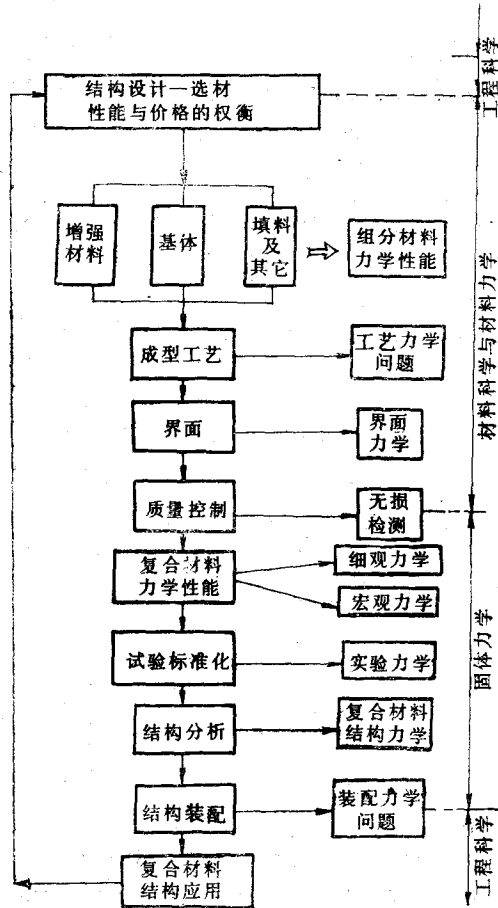


图1-4 复合材料开发与应用中的力学问题

力、固化时间、树脂流动性等参数对产品质量，诸如残余应力的
大小、孔隙率的高低等都有直接关系。建立这些参数对产品质量
影响的力学模型，并编制 CAD/CAM 软件系统，对复合材料业
的发展意义非常之大。对于钢纤维混凝土复合材料，其成型工艺
应包括配合比设计、施工时的搅拌、运输、浇筑和养护。

3. 界面力学问题

界面是复合材料“心脏”。界面行为对复合材料性能,尤其是断裂、损伤以及疲劳性能等至关重要。通过纤维的表面改性,或选择适当的树脂,以及选择最佳复合工艺,以达到预期的界面设计,制取具有优异综合性能的复合材料,就是所谓的“界面工程”。这里面有大量的化学问题,也有很多力学问题,如界面热力学问题,界面层性能的特征,界面应力、应变状态,以及界面裂纹问题等。由于界面层厚度极小,很难直接观察与测量,界面力学是很棘手的力学问题。

4. 无损检测

由于复合材料在制造过程中不可避免会产生各种加工缺陷,如气泡、孔洞、界面脱粘、微裂纹、层间开裂、纤维排列不均匀或方向不一致以及树脂或混凝土富集区或各种夹杂等,而这些缺陷又往往是裂纹与损伤的发源地,使材料强度降低,寿命缩短,所以产品或构件在成型过程中应对原材料、配合比、成型的主要环节按有关规程进行质量检验,或在产品和构件使用之前,用声发射、超声波、X射线技术等手段进行无损检测。

5. 复合材料细(微)观力学

复合材料细观力学主要研究组分材料在复合状态下的力学行为,以及它们对复合材料宏观力学性能的影响。例如研究基体内纤维端部的应力、应变场、及其随时间的变化;研究裂纹与纤维的相互作用,研究材料断裂过程中的界面脱粘与纤维拔出等。

6. 复合材料宏观力学

宏观力学忽略细观结构的存在,用均质各向异性模型来描述材料的力学行为。这就是以所谓“唯象论”的方法处理问题而不深究其细观层次上的物理机制。例如用唯象论方法研究断裂、损伤、疲劳、粘弹性、热性能、蠕变、持久强度、老化、腐蚀、磨损与冲击等力学问题。

7. 装配力学问题

复合材料零件或构件必须与其它构件装配连接在一起才能发挥其结构效能。与传统材料相比，复合材料的装配连接问题要复杂得多。连接方式有胶接、机械连接或胶接加机械固定等不同方式。由于接头集中了很强的应力，局部损伤往往发源于这里。装配力学是复合材料力学中较难处理的问题之一。

8. 复合材料结构力学

复合材料结构力学是传统固体力学，如板、壳力学向复合材料结构分析方向的发展与延伸。主要内容包括基于层合板理论分析复合材料梁、杆、板与壳等简单结构的变形、弯曲、振动与弹性稳定问题。这些问题直接与结构设计有关。

在上述复合材料的力学问题中，本书的重点是用细观和宏观力学的方法研究纤维增强复合材料，尤其是钢纤维增强混凝土复合材料的力学性能及计算方法。

§1-3 钢纤维混凝土复合材料

纤维增强复合材料是由纤维与基体复合而成的，这些组分材料的化学成分、性质、宏观尺寸上的形状是互不相同的。纤维可以是人造的，也可以是天然的（如竹子或麻纤维）；既可以是连续的，又可以是短切的。纤维与基体互不相溶，复合后各自保持原有的特性。下面重点介绍钢纤维增强混凝土复合材料。

一、钢纤维混凝土的组成材料

纤维混凝土是纤维与混凝土基体两部分组成的一种新型复合材料。纤维的种类很多，就其材料性质可分为矿物材料，如石棉、硼、碳素、玻璃纤维；合成材料，如尼龙、聚脂、聚丙烯、芳香基聚酸铵等纤维；金属材料，如不锈钢和低碳钢纤维，以及植物材料纤维等，通常以玻璃纤维、钢纤维、聚丙烯纤维的使用较普遍。作为复合材料基体的有水泥砂浆、混凝土、环氧树脂、石膏等。在纤维水泥和纤维混凝土拌合物中掺加各种少量外加活性

材料,将进一步改善和提高纤维混凝土的活性和减少水泥用量。

试验结果表明,纤维在基体中的破坏形式有两种,当纤维比较长时发生拉断破坏,较短时则只能发生拔出破坏。对于发生纤维拉断破坏的纤维复合材料,纤维的抗拉强度对其力学性能无疑有影响。但对于钢纤维混凝土材料,由于施工要求,实际工程中应用的钢纤维一般较短,基本上都是发生纤维拔出破坏,那些影响纤维与基体粘结强度的因素,如纤维长径比、几何形状以及表面粗糙程度等都是影响纤维混凝土力学性能的主要因素。与此相应,为了提高纤维与基体间的粘结强度,除圆直纤维外的钩形纤维、扁头纤维、波形纤维、压痕纤维、异形截面纤维等不同形状的钢纤维正大量出现,制造钢纤维的方法也在不断更新,常用的方法有:钢丝冷拔法、薄钢板剪切法、熔钢抽出法和机床加工法。

对常用的混凝土基体,其发展方向是高强、轻质、耐久、抗震、抗爆。发展高强混凝土的措施除采用高标号水泥,改进拌合振捣工艺外,合理利用优质掺合料(粉煤灰、硅灰、沸石或磨细的粒状高炉矿渣、稻壳灰等)和高效减水剂是有效的方法。利用天然轻骨料(如浮石、凝灰石等)、工业废料轻骨料(如炉渣、粉煤灰陶粒、自燃煤矸石及其轻砂)、人造轻骨料(如页岩陶粒、粘土陶粒、膨胀珍珠岩等及其轻砂)制成的轻骨料混凝土作为基体,具有容重小、相对强度高、保温、抗冻性能好等优点。

二、钢纤维混凝土的力学性能^[1]

(一) 钢纤维混凝土的强度和变形

1. 钢纤维混凝土的强度及影响因素

钢纤维混凝土中乱向分布的短纤维主要作用在于阻碍混凝土内部微裂缝的扩展和阻滞宏观裂缝的发生和发展。因此对于其抗拉强度和主要由主拉应力控制的抗弯、抗剪、抗扭强度等有明显的改善作用。当纤维体积率在1%~2%范围内,抗拉强度提高40%~80%,抗弯强度提高60%~120%,用直接双面剪试验所测定

的抗剪强度提高50%~100%。抗压强度提高幅度较小，一般在0~25%之间。

根据纤维增强机理的各种理论，诸如纤维间距理论、复合材料理论和微观断裂理论，以及大量的试验数据的分析，可以确定纤维的增强效果主要取决于基体强度 (f_m)、纤维的长径比(指钢纤维长度 l_f 对直径 d_f 或等效直径的比值，即 l_f/d_f)、纤维的体积率(指一立方米钢纤维混凝土中钢纤维所占体积百分数，用 V_f 表示)、纤维与基体间的粘结强度 (τ)，以及纤维在基体中的分布和取向 (η) 的影响。

当钢纤维混凝土破坏时，大都是纤维被拔出而不是被拉断，因此改善纤维与基体间的粘结强度是改善纤维增强效果的主要控制因素之一。改善的办法有3种：

(1) 增加纤维的粘结长度(即增加长径比)。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，但纤维太长会影响拌合物的和易性和施工质量，甚至导致强度降低，直径太细易在拌合过程中被弯折，太粗则同样体积率时增强效果差，所以纤维长度一般为20~50mm，最长不超过60mm，直径在0.3~0.8mm，长径比一般在40~100mm之间。

(2) 改善基体对钢纤维的粘结性能。例如掺入15%的聚合物(美国的RhoplexE-330)可使钢纤维粘结强度提高1.6倍，钢纤维砂浆($V_f=1.5\%$)的抗拉强度提高3.9倍；又如，掺入10%硅灰可使纤维的粘结强度提高20%，钢纤维混凝土的抗折强度提高40%，如再加入超塑化剂使水灰比降低，提高的幅度还要大些。

(3) 改善纤维的形状，增加纤维与基体间的摩阻和咬合力。例如可以沿钢纤维的轴线方向以一定间距对截面进行塑性加工，或对钢纤维的端部进行加工，使其成为异型钢纤维。一般情况下，圆直纤维粘结性能较差，变截面纤维和波形纤维较好，两端带钩纤维介于中间。纤维品种不同，粘结强度最大可相差1倍以