

高等学校教材

# 增强塑料

——细观结构与力学性能

孙曼灵 编

西北工业大学出版社

1990年1月 西安

# 前 言

本书是为高分子材料及复合材料专业大学本科高年级学生编写的选修课教材。本课程是合成树脂及塑料、聚合物基复合材料等专业课内容的继续、扩充和加深。为了避免重复,在编写时没有追求增强塑料内容的系统性、完整性和严密性。

近 30 多年来,科学技术几乎在各个领域都发生了深刻的变化,出现了新的飞跃。据估计,人类的科学知识在 19 世纪约每 50 年增加 1 倍,本世纪中叶约每 10 年增加 1 倍,到 70 年代大约每 5 年增加 1 倍,目前约每 3 年增加 1 倍。现在每天约有 6 000 到 8 000 篇科学论文发表。总之,各种信息和资料在迅速地、大量地增长。有人说,现在已到了“信息爆炸”或“知识爆炸”的时代。同样,增强塑料在近 30 多年来,特别是近 10 年来也有飞速的发展,从基本理论到具体材料和工艺都有许多新的成就和突破,涌现出大量的论文、资料和专著。应该充分利用这些大量的信息和资料,为四化建设服务,迎接新技术革命高潮的到来。但是,目前还找不到一本介绍这些最新成果和信息的、合适的教科书。编者深感有必要给高年级学生编一本初步了解增强塑料领域的新成就和新动向的资料,起点搭桥引路的作用,使学生能尽早地接触到本学科的最新知识,以开扩视野、活跃思路。这就是编写这本教材的目的和意图。因此,本书对有些不太成熟的理论和有争议的观点也适当地给以介绍,以期能引起学生在理解的基础上开展积极的思考和讨论,通过自己的思考、分析和实践,来批判地继承,并能有所发展、有所创新。本书选材的基点是从高分子材料专业本科生的实际水平和需要出发,不是从力学的角度,而主要是从材料学的角度进行分析讨论。主要采用材料力学的方法,而尽量不用弹性力学、断裂力学等方法。避开繁琐的数学推导,着重物理概念的阐述,以期能对材料的选用和材料设计,以及工艺的制定等方面有所裨益。

本书是在讲义的基础上,经过较大的删节、增补和修改后,编写出来的。书中着重从材料学的角度,用细观力学方法,分析了长纤维、短纤维、有机纤维和混杂纤维增强塑料,以及薄片和微粒增强塑料的细观结构与力学性能的关系,并对增强塑料的损伤和断裂分析做了一些简单的介绍。希望能使读者对上述领域的最新发展有一点初步了解。

在讲义的试用过程中,西北工业大学周希真、高松品、林潮江等同志以及六届学生对讲义的内容提出了许多宝贵的意见;这次编写时又参考了国内外发表的大量文献,以及王汝敏、王惠民、王绍鸿、蔡长庚和陈立新的毕业论文。书中还溶有西北工业大学 405 教研室同志们在教学中的心得体会和科研成果。西安交通大学卢凤纪副教授细心地审阅了本书并提出不少改进意见。在此谨向他们表示衷心的感谢。我还应该感谢我的老师黄蕴元教授和 П. А. Ребиндер 院士,他们在材料科学及工程方面的卓越见解,使我受益匪浅。这本书的思路是深受他们的影响的。

由于资料浩瀚而又限于编者的水平,书中错误和不妥之处在所难免,取材也不尽恰当,恳请各位专家和读者多多批评指教,以便进一步修改、更正、补充,使本教材不断得以充实。

编 者

1989年6月

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
<b>第二章 长纤维单向增强塑料增强机理的细观力学分析</b> .....	4
§ 2-1 引言.....	4
§ 2-2 细观力学的基本假设.....	5
§ 2-3 纵向拉伸性能.....	6
§ 2-4 横向拉伸性能.....	12
§ 2-5 纵向压缩性能.....	21
§ 2-6 横向压缩性能.....	27
§ 2-7 面内剪切性能.....	30
§ 2-8 小结.....	34
<b>第三章 短纤维增强塑料</b> .....	36
§ 3-1 引言.....	36
§ 3-2 短纤维增强塑料增强机理的细观力学分析.....	37
§ 3-3 短纤维增强塑料用的纤维及其特点.....	44
§ 3-4 短纤维增强塑料的树脂基体及其特点.....	46
§ 3-5 短纤维增强热塑性塑料的性能.....	49
§ 3-6 短纤维增强热固性塑料的性能.....	59
§ 3-7 短纤维增强塑料的发展动向.....	62
<b>第四章 薄片增强塑料</b> .....	65
§ 4-1 引言.....	65
§ 4-2 薄片增强塑料增强机理的细观力学分析.....	66
§ 4-3 主要的薄带增强塑料.....	69
§ 4-4 鳞片增强塑料.....	71
<b>第五章 微粒增强塑料</b> .....	77
§ 5-1 引言.....	77
§ 5-2 微粒增强塑料增强机理的细观力学分析.....	78
§ 5-3 微粒的结构和性能对增强塑料结构和性能的影响.....	84
§ 5-4 微粒增强塑料的性能.....	87
<b>第六章 有机纤维增强塑料</b> .....	89
§ 6-1 引言.....	89

§ 6-2 增强用有机纤维的结构与性能·····	89
§ 6-3 有机纤维增强塑料的性能·····	100
§ 6-4 有机纤维增强塑料的特点·····	104
<b>第七章 混杂纤维增强塑料·····</b>	<b>110</b>
§ 7-1 引言·····	110
§ 7-2 混杂纤维增强塑料增强机理的细观力学分析·····	111
§ 7-3 单向连续纤维混杂增强塑料的力学性能·····	114
§ 7-4 混杂效应·····	123
<b>第八章 增强塑料增强机理的损伤和断裂分析简介·····</b>	<b>125</b>
§ 8-1 引言·····	125
§ 8-2 均质材料(组分材料)的断裂分析·····	126
§ 8-3 单向纤维增强塑料纵向拉伸时的断裂分析·····	132
<b>结束语·····</b>	<b>138</b>
<b>思考题·····</b>	<b>140</b>
<b>参考文献·····</b>	<b>143</b>

# 第一章 绪 论

## § 1-1 增强塑料及其分类

增强塑料即树脂基复合材料，它是目前研究得最多、应用得最广的一种复合材料，具有重量轻、强度高、模量大、耐腐蚀性好、电性能优异、原料来源广泛、加工成型简单、生产效率高特点，并具有可设计性，以及一些其他特殊的性能，如减震、消音、透波、隐身、耐烧蚀等特点，已经在许多地方成功地取代了金属、木材，用作结构材料，其发展速度超过了历史上任何材料的发展速度。有人预言，21世纪将是塑料时代或复合材料时代。

增强塑料主要是由树脂基体和增强材料构成的多相体系。树脂基体为连续相，增强材料为分散相或第二连续相。增强材料的强度和模量一般都比基体的高。当它被制成纤维后，其强度比块状时大得多。但是只有把众多的单根纤维胶结成一个整体，才能发挥它的性能。同时，还需要对纤维表面加以保护，防止因损伤使强度降低。树脂是一种合适的介质，它可以把纤维粘结成一个整体，构成树脂基复合材料，从而发挥了高强相的性能。因此，把树脂基复合材料叫做“增强塑料”是不确切的。但是由于历史的原因，它得到了公认。在塑料的基础上发展为复合材料，似乎是塑料被增强了。增强塑料发挥了各组分的特点和潜在能力，又克服了单一材料的某些不足，从而达到对材料某些性能的综合要求。因此叫树脂基复合材料更为确切。

增强塑料的性能取决于各组分的性能，如增强材料的形状、数量及分布，体系的形态和相界面的性能等。所以，只要改变形态学的性质或界面的性质，就会使增强塑料的各种性质发生多种多样的变化。例如，两相间粘附键的强度是界面的一个重要性能，它对增强塑料的力学性能具有明显的影响。

增强塑料的类型按照树脂基体的种类可分为：热固性增强塑料和热塑性增强塑料。若按增强材料的形态可分为：长纤维增强塑料、短纤维增强塑料、微粒增强塑料等。

## § 1-2 增强塑料的发展概况

增强塑料是一门年青的学科，它的历史还不到100年。第一个人工合成的树脂——酚醛树脂的出现是上个世纪的事。可是由于性脆，一直没有什么实用价值。直到1909年发现加入木粉、纤维等可以改进它的脆性，才使酚醛塑料成为有实用性能的塑料，并实现了工业化生产。可以说，这是第一个增强塑料品种，是一种低效能的增强塑料。随后，又陆续合成出许多热固性和热塑性树脂。但是高效能的增强塑料是在1931年玻璃纤维工业化生产后才出现的。1932年热固性玻璃钢首先出现。当时，主要用作绝缘材料。30年代末，第二次世界大战期间，为了解决飞机的雷达罩，促进了增强塑料的研究和发展。1941年采用聚酯玻璃钢解决了雷达罩问题。1944年3月机身用增强塑料制成的BT-15型飞机试飞成功，并第一次成功地用增强塑料制作了主要的飞机结构部件。接着AT-6型飞机用增强塑料制

成机翼，还生产了数千个飞机和舰艇部件以及成百万只钢盔内衬。1946年玻璃钢开始转到了民用方面，成为船只、汽车、建筑、电子器材、管道、贮罐等的重要材料。50年代初期环氧树脂的出现，大大提高了玻璃钢的性能和作用。随着空间技术和国防工业发展的需要，碳纤维、硼纤维及其复合材料在60年代发展了起来，现已由军用逐渐推广到民用了。70年代又出现了Kevlar等有机纤维及其复合材料，以及混杂纤维复合材料。

热塑性增强塑料出现得比较晚。1951年首先出现了玻璃纤维增强聚苯乙烯。但是，在随后的10多年间，热塑性增强塑料发展很慢。1960年实现了玻璃单丝增强尼龙，显著地提高了尼龙的耐热性、模量等性能。一直到60年代中期，热塑性玻璃钢才开始迅速发展起来。很快，几乎所有热塑性塑料都有了增强品种。近年来热塑性增强塑料的年增长率平均达25—30%，增长速度已超过热固性增强塑料。随着复合技术和偶联技术水平的提高，将会有更快的发展。有人认为，目前已进入“热塑性复合塑料时代”。

### § 1-3 增强塑料与四化建设

翻开人类的文明史就会发现，人类对材料的取得和使用是随着社会的生产力和科学技术的发展而不断发展的，它反映了人类认识自然和改造自然的能力，同时每当出现一种划时代的新材料，又会使生产力获得一次巨大的发展，人类社会就出现一个飞跃。因此，材料就成为人类文明进步的标志，成为人类历史时代划分的里程碑。从材料的角度来看，人类社会经历了石器时代、青铜器时代、铁器时代。20世纪中叶出现了高效能的塑料和复合材料以来，它以它优异的性能迅速地渗透到国民经济和人类生活的各个领域，发展之快在历史上是少有的。它不仅在许多地方取代了钢铁、木材等传统材料，而且在有些方面又是其它材料无法取代的，如雷达罩用材、耐烧蚀材料等。据估计，在不久的将来，聚合物材料的产量不仅在体积上，而且在重量上都将超过钢铁的产量。无怪乎有人认为21世纪将是塑料时代，或复合材料时代。

材料是工业、农业、国防、科学技术和人民生活的物质基础。生产和科学技术的发展对材料提出愈来愈高的要求，推动了新材料的研究和发展。而重大的新材料的出现又会给生产和科学技术的巨大发展和突破提供必要的物质条件。这就是它们之间的辩证关系，也可以看出材料在四化建设中的地位和作用。以航空工业为例，从航空发展史上就能看到，一种重大的新材料的出现可以促使各有关技术产生质的飞跃，成为航空技术重大突破的原因之一。例如，在航空工业初期(1900—1920年)，飞机的主要结构材料是木材、张线和帆布，所以结构强度很低，飞机只能作低速飞行。1931年以后，高强铝合金的出现，在材料上提供了克服“音障”，实现超音速飞行的条件。1954年以后，钛合金的引入才使飞机有可能克服“热障”，进入更高的飞行速度范围(超过2M)。由于飞机是用铝合金和钛合金制成的，银光闪闪，故有“银燕”的美称。随后，原来界限非常分明的金属材料、高分子材料和无机非金属材料逐渐又组合成一类新的材料——复合材料。它发挥了组成材料的潜在能力，大幅度地提高了材料的性能。第一代复合材料是玻璃钢，主要用作透波材料(雷达罩)。60年代发展了高强度、高质量的硼纤维、碳纤维等高性能纤维及其复合材料，为第二代复合材料，其比强度、比刚度、耐疲劳性和断裂安全性等都比金属材料优越。70年代初期用于承力不大的构件，如口盖、舱门、护板、方向舵等。70年代中期扩大到承力较大的次承力构件，如襟翼、垂直尾翼、水平尾翼等。70年代后期已用于主承力构件，如机翼抗

扭盒、机身纵梁、蒙皮等，已经有了两种全复合材料飞机(里尔帆 Lear Fan 和阿弗特克 Avtek 400)，从而天空中出现了“黑鸟”(因为碳纤维复合材料是黑色的)。飞机结构材料从金属材料过渡到复合材料的变革是突破性的，国外有人称之为“黑色革命”。复合材料的另一个优点是能通过纤维的不同方向、不同层数的剪裁与铺层，可以得到与载荷分布相匹配的强度和模量，实现气动剪裁。例如，其可耦合的弯曲扭转变形，能克服飞机在大速度飞行时产生的气动弹性问题，从而使前掠机翼布局得以实现。同时还可使飞机结构重量减轻约 35%，燃油节省约 30%。70 年代还发展了 Kevlar 纤维及其复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料以及混杂复合材料等，使材料的性能又有进一步的提高。看来，复合材料的使用对飞机的发展极有可能带来第三个飞跃，其影响程度如何，目前还很难加以预料。

当前一个不可估量的新技术革命的巨大浪潮已经以迅猛之势改变着整个世界，无论其规模还是深度都是历史上未曾有过的。作为这场新技术革命的三大支柱是材料、能源和信息。可以形象地说：能源是血液，材料是骨肉，信息是神经。可见材料之重要。我们应该抓住这个大好时机，努力提高材料科学和工程的水平，促进我国社会主义现代化的发展进程。

## 第二章 长纤维单向增强塑料增强机理的 细观力学分析

### § 2-1 引 言

研究复合材料的力学性能时，有两种层次的抽象。当所研究对象的尺寸远远大于单个分散相的尺寸时，即其特征尺度为制件的厚度、宽度和长度时，称为宏观力学(或粗观力学)。宏观力学把复合材料看成是连续分布的和性能均匀的材料。例如，微粒增强塑料被当作各向同性材料；连续纤维单向或多向增强塑料被当作正交异性材料等。宏观力学把复合材料作为具有统一性能的统一材料来对待，而将组分材料的影响仅仅作为复合材料的平均表现性能来考虑，即复合材料中各组分材料的影响和贡献反映在这种平均的统一性能之中。由于复合材料实际上是多相的非均质材料，影响其力学性质的因素很多，如组分材料的性能、含量及分布，界面粘结情况，孔隙的形状、大小及含量等。在实际产品中，组成材料的品种及规格、增强形式、铺层方法、工艺条件以及承载情况等又是千变万化的。因此，用宏观力学的方法在一定条件下测得复合材料力学性能的标准值并不等于实际制件的承载能力。所以宏观力学分析虽然为结构设计提供了必要的的数据，但是感到困难的是材料许用强度的选取问题，同时它也不能从理论上说明材料具有这些力学性能的原因，不能确切地判断在材料设计和制备时影响材料性能的因素，不能提供选用和开发新材料的理论基础，不能实现设计材料的目的。

为了能设计材料，使之达到预定的性能，必须考虑复合材料的各个组分在复合材料的平均统一性能中起什么作用，怎样改变不同的组分及其形态、用量、配置和相互作用，从而使复合材料具有所要求的性能。为此，必需研究复合材料的细观结构和性能对其平均力学性能的影响，这就是复合材料的细观力学。所谓细观，就是以纤维和微粒的表征尺寸作为研究对象的大小的量级。

细观力学把增强材料和基体作为性质不同的物质来对待，它们之间的粘结被认为是理想的。也就是说，细观力学认为，复合材料是由两种或两种以上性质不同的、均质的、各向同性的单相材料组成的多相非均质体系。细观力学研究各组分材料的性能、含量、配置等与复合材料性能的关系，从而形成了材料科学与工程的一个新领域——复合理论。复合理论的目的是通过细观力学的分析，研究组分材料对复合材料性能的影响规律和机理，提供预测复合材料性能的知识，从而可以有目的地、有方向地设计和制造具有某种宏观性能的材料，以满足工程的需要。在这个富有诱惑力的目标下，已经在细观力学方面作了大量工作，但是理论的发展离目标还相差很远。目前，复合理论在定性分析方面有了相当大的进展，而在定量方面尚很不足。

在复合材料的力学分析中，宏观力学和细观力学是互相补充的。宏观力学分析为结构设计提供了基础，而在研究材料的破坏机理时，就要深入到微观和细观层次了。细观力学为材料设计提供了理论依据。利用二者的结合，才能合理地进行复合材料的材料设计和结构设计。因此，对增强塑料进行细观力学分析，研究各组分在增强塑料的力学性能中各起



什么作用，了解其增强机理、规律和效果，这对于合理地选择、设计、制备和使用增强塑料是很重要的。

复合材料的细观力学分析方法主要有：材料力学方法、弹性力学方法和半经验法。材料力学方法是在一系列关于应变分布或应力分布规律的简化假设下进行推导的。弹性力学方法则是从基本方程(广义虎克定律、平衡方程和几何协调方程)出发，不依赖于进一步的简化假设，运用弹性理论进行分析。但是，它往往无法得出结果，或虽能得出结果，但表达式极为复杂。因此还要引进某些附加的假设或实验修正。半经验法是在分析的基础上，以实验值为依据作出某种修正，以求所获计算结果与实验值接近。本书将主要用材料力学方法。因为它比较简单，并且对定性地了解增强塑料的增强机理是够用了。关于弹性力学方法(极值法、精确解法等)，请查阅有关文献。

在实际工程中，用长纤维(连续纤维)增强塑料制造的板或构件，通常都是由若干层性质和/或方向性不同的单向铺层叠合而成。所以，单向板，即单向增强塑料，是叠层板结构的基本结构单元。为了改进材料的力学性能以及进行材料设计，必须首先了解单向增强塑料的基本力学性能及其影响因素。由于学时数的限制，有关正交铺层及斜交铺层复合材料的力学性能，在此就不讨论了。长纤维增强塑料已在“复合材料”课中做有详细的介绍。所以本书只从增强机理的角度，做一概括的叙述。

## § 2-2 细观力学的基本假设

细观力学的研究对象是复合材料的多相结构，但又不能顾及到组分材料的性能、含量、配置等的各种可能结合。因此，细观力学必须以一系列假设作为基本出发点。这些假设归纳起来主要有：

1. 基体材料和增强材料本身都是均质的、连续的、各向同性的材料，没有缺陷，如孔隙、裂纹等。

2. 增强塑料中各组分材料的力学性能与相应的各单一组分材料的力学性能相同。即薄膜状、纤维状及微粒状材料的性能与其块状材料的性能相同。

3. 各组分材料之间在性能上互相没有影响，增强塑料各组分的作用可以单独考虑，即相互作用可以忽略不计。

4. 分散相的形状和分布是规则的、均匀的。例如：纤维是圆柱形(或正方柱形)的，沿长度方向断面尺寸无变化，不弯曲。纤维排列规整，相互之间的距离均匀。微粒材料为圆球体(或正立方体)，在空间分布均匀。

5. 增强塑料所承受的载荷由增强材料和基体材料共同承担。二者之间相互牢固地粘结成一个整体，从而在载荷作用下不发生相互滑移及脱粘现象。基体、增强材料及其界面具有相等的应变(正应变和剪应变)，即所谓变形协调(变形一致)。或者在载荷作用下(如横向受力时)具有相等的应力。此即等应变或等应力假设，也叫整体性假设。

6. 受载时，基体和增强材料的应力-应变关系都服从广义虎克定律，即处于线弹性状态。这在低应力时是与真实情况相接近，不考虑与时间因素有关的变形行为，并且基体和增强材料的泊松比相等。这样，两相之间不会由于不同的体积变化而发生剥落。此假设称为线弹性假设。

7. 受载前, 增强塑料及其各组分材料都处在无应力(包括内应力)和无应变状态, 称为零初应力假设。这完全是为了使问题简化, 但与实际情况有一定差距。在制备增强塑料的过程中, 纤维会具有不同的初应力, 受载后, 最先达到破坏应力的纤维先断。所以总的破坏过程必然是纤维逐步断裂, 最后达到全面崩溃的过程, 而不是所有纤维同时一齐断裂。

8. 忽略试件末端的影响和边缘效应。

### § 2-3 纵向拉伸性能

典型的单向增强塑料如图 2-1 所示。它是由平行的纤维嵌入基体中构成的, 呈现出正交各向异性的特性, 并具有三个对称平面。平行于纤维的方向叫纵向(1轴), 垂直于纤维的方向叫横向(在2-3平面中的任何一个方向)。增强塑料沿纵向有最强的性能, 沿其它两个方向(2和3轴), 材料性能近似相等, 可看作是横向各向同性的, 即在2-3平面内材料是各向同性的。所以单向增强塑料具有五个特征强度值和刚度值, 即纵向拉伸强度和模量、横向拉伸强度和模量、纵向压缩强度和模量、横向压缩强度和模量、面内剪切强度和模量。

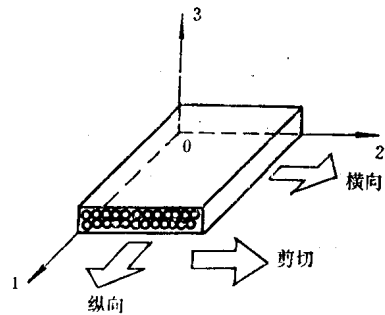


图 2-1 单向增强塑料示意图

单向增强塑料纵向拉伸总载荷  $P_{cL}$  由纤维和基体共同承担, 分别为  $P_f$  和  $P_m$ , 即

$$P_{cL} = P_f + P_m$$

用应力表示:

$$\sigma_{cL} A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

$$\sigma_{cL} = \sigma_f \frac{A_f}{A_c} + \sigma_m \frac{A_m}{A_c}$$

由于

$$V_f = \frac{A_f}{A_c}, \quad V_m = \frac{A_m}{A_c}$$

所以

$$\sigma_{cL} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (2-1)$$

式中:  $P$ ,  $\sigma$ ,  $A$ ,  $V$  分别为载荷、应力、截面积、体积百分含量。脚标  $c$ ,  $f$ ,  $m$ ,  $L$  分别表示增强塑料、纤维、基体及纵向性能。

根据等应变假设, 纤维的应变  $\varepsilon_f$ , 基体的应变  $\varepsilon_m$  和增强塑料的应变  $\varepsilon_c$  相等, 即

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_c = \varepsilon$$

将(2-1)式对应变  $\varepsilon$  求导, 得

$$\frac{d\sigma_{cL}}{d\varepsilon_c} = \frac{d\sigma_f}{d\varepsilon_f} V_f + \frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_m} V_m \quad (2-2)$$

式中:  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$  表示相应的应力-应变曲线在给定应变点的斜率。

若材料的应力-应变曲线是直线, 则斜率  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$  是常数。即可用相应的弹性模量来表示。

$$E_{cL} = E_f V_f + E_m V_m \quad (2-3)$$

式中： $E$ 为弹性模量。

公式(2-1)，(2-2)，(2-3)称为应力和弹性模量的并联关系混合定律。它反映了各组分在增强塑料平均性能中的贡献。其贡献与该组分的性能及体积百分含量成正比。通常纤维的强度和模量比树脂基体大得多，所以纤维的强度、模量及体积百分含量愈高，则增强塑料纵向拉伸强度和模量也愈高，即增强的效果愈大。

增强塑料受力后，其纤维和基体承担载荷的大小是按它们的模量大小分配的。

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_m A_m} = \frac{E_f \varepsilon_f \frac{A_f}{A_c}}{E_m \varepsilon_m \frac{A_m}{A_c}} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m}$$

由于假设材料内部无缺陷、无孔隙，即 $V_f + V_m = 1$ ，上式可写为：

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{E_f}{E_m} \cdot \frac{V_f}{(1-V_f)} \quad (2-4)$$

当 $V_f$ 一定时， $P_f/P_m$ 与 $E_f/E_m$ 成正比关系(图 2-2)。从式(2-4)及图 2-2 中可以看出，随着纤维模量的提高和纤维体积分数的增大，纤维所承担载荷的比例也随着增大。为了更明显地说明此关系，还可以导出纤维载荷与增强塑料总载荷的比值，即纤维承载占增强塑料总载荷的百分率的函数式：

$$\begin{aligned} \frac{P_f}{P_{cL}} &= \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_{cL} A_c} = \frac{E_f V_f}{E_{cL}} = \frac{E_f V_f}{E_f V_f + E_m V_m} = \frac{E_f/E_m}{E_f/E_m + V_m/V_f} \\ &= \frac{E_f/E_m}{E_f/E_m + (1-V_f)/V_f} \end{aligned} \quad (2-5)$$

相应的曲线表示于图2-3中。

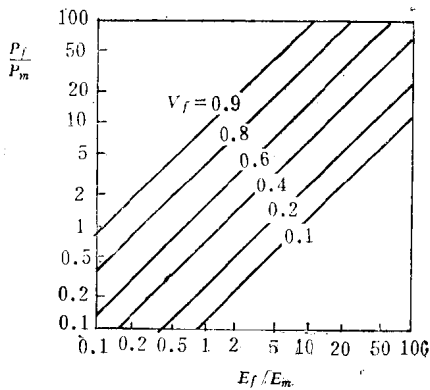


图 2-2 不同 $V_f$ 条件下 $P_f/P_m$ 与 $E_f/E_m$ 的关系

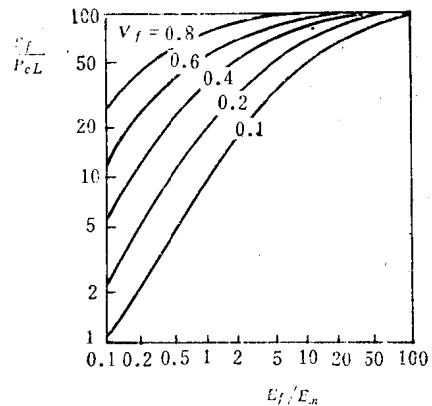


图 2-3 不同 $V_f$ 条件下 $P_f/P_{cL}$ 与 $E_f/E_m$ 的关系

从图2-2及图2-3中可以清楚地看出：

1. 提高纤维模量，即提高 $E_f/E_m$ 比值，可以增加增强塑料中纤维承载的比例。由于纤维的强度 $\sigma_{fu}$ (脚标 $u$ 表示极限值)大于基体的强度 $\sigma_{mu}$ ，所以能提高增强塑料的强度 $\sigma_{cLu}$ 。以玻璃纤维增强环氧塑料而言，其 $E_f/E_m$ 约为20左右。因此，即使 $V_f = 10\%$ ， $P_f/P_{cL}$ 也大约能达到70%。也就是说，有70%的载荷是由纤维承担的。但是如果 $E_f/E_m$ 太大，则会影

响应力的传递，在界面处形成应力集中，反而使强度降低。

2. 增加纤维体积含量 $V_f$ 也能增加纤维承载的比例和 $\sigma_{cl}$ ，所以应尽可能地增加 $V_f$ 。但是无论是从理论计算上，还是从实际制备上，都不可能使 $V_f$ 达到100%。理论计算表明，平行六方排列的圆柱形纤维的最大体积含量 $V_{fmax} = 90.7\%$ ；平行立方排列时为78.5%，平行无规排列时为82%。但是，当 $V_f > 70\%$ 时，实际测得增强塑料的强度通常随 $V_f$ 的增加而降低。这是由于纤维含量太多时，基体含量相对太少，在制备时难以保证基体充分地渗入并浸润全部纤维束表面，以致局部缺胶，造成孔隙、裂缝等缺陷，承载时形成应力集中源，使强度下降。

**【例题 2-1】** 计算玻璃纤维增强环氧塑料中纤维承载的比值。已知玻璃纤维的弹性模量为72GPa，环氧树脂的弹性模量为3.6GPa，纤维体积含量 $V_f$ 分别为10%和60%。

解

$$\frac{E_f}{E_m} = \frac{72}{3.6} = 20$$

当 $V_f = 10\%$ 时

$$\frac{V_m}{V_f} = \frac{1 - V_f}{V_f} = \frac{1 - 0.1}{0.1} = 9$$

$$\frac{P_f}{P_{cl}} = \frac{20}{20 + 9} = 0.69$$

当 $V_f = 60\%$ 时

$$\frac{V_m}{V_f} = \frac{1 - 0.6}{0.6} = 0.67$$

$$\frac{P_f}{P_{cl}} = \frac{20}{20 + 0.67} = 0.97$$

**【例题 2-2】** 若上例中的纤维改为碳纤维时，计算纤维承载的比值。已知碳纤维的弹性模量为432GPa。

解

$$\frac{E_f}{E_m} = \frac{432}{3.6} = 120$$

当 $V_f = 10\%$ 时

$$\frac{P_f}{P_{cl}} = \frac{120}{120 + 9} = 0.93$$

当 $V_f = 60\%$ 时

$$\frac{P_f}{P_{cl}} = \frac{120}{120 + 0.67} = 0.99$$

混合定律(2-1)和(2-2)式能准确地反映单向复合材料承受纵向拉伸载荷时的应力-应变行为。但是若要用弹性模量 $E$ 代替斜率 $d\sigma/d\varepsilon$ ，将(2-2)式化简为(2-3)式，则其组成材料必须都处于弹性变形范围，而弹性变形只是复合材料应力-应变行为的一小部分。它对于玻璃纤维或陶瓷纤维增强热固性塑料是适用的。一般说来，单向纤维增强塑料在承受纵向拉伸载荷时，其变形可能出现如图 2-4 所示的四个阶段。

- ① 纤维和基体都是弹性变形；
- ② 纤维仍是弹性变形，而基体为塑性变形；
- ③ 纤维和基体都进入塑性变形阶段；
- ④ 纤维或基体断裂，接着增强塑料破坏。

这四个阶段不一定对每一种增强塑料都会出现。例如，当纤维是脆性材料时，没有第③阶段；当基体是脆性材料时，没有②，③阶段。增强塑料的最后破坏可能是由纤维破坏所决定，或者由基体破坏所决定。一种组分的破坏是否会导致增强塑料的立即破坏，取决于它们的体积分数和是否具有塑性变形。

增强塑料各阶段的模量估算如下：

阶段①：

$$E_{cL} = E_f V_f + E_m V_m$$

阶段②：它占复合材料应力-应变曲线的最大部分。

$$E_{cL} = E_f V_f + \left( \frac{d\sigma_m}{d\epsilon_m} \right) \epsilon_c V_m \quad (2-6)$$

式中： $\left( \frac{d\sigma_m}{d\epsilon_m} \right) \epsilon_c$  为复合材料的应变为  $\epsilon_c$  时，基体应力-应变曲线上的斜率。一般比  $E_f$  小得多，可忽略不计。所以上式可简化为：

$$E_{cL} = E_f V_f$$

阶段③：

$$E_{cL} = \frac{d\sigma_f}{d\epsilon} V_f + \frac{d\sigma_m}{d\epsilon} V_m \quad (2-2)$$

增强塑料的纵向拉伸强度：

1. 纤维相对于基体来说是脆性材料的情况。例如，玻璃纤维、硼纤维、碳纤维与韧性环氧树脂或聚酯树脂组成的增强塑料，纤维是脆性破坏，基体是塑性破坏，并且纤维的断裂应变  $\epsilon_{fu}$  小于基体的断裂应变  $\epsilon_{mu}$ ，其应力-应变曲线如图2-5所示（注意，此图未反映  $V_f$  的影响及破坏过程的快慢）。

纤维断裂前增强塑料的应力为：

$$\begin{aligned} \sigma_{cL} &= \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \\ &= \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \end{aligned}$$

当增强塑料的应变  $\epsilon_c$  达到纤维断裂应变  $\epsilon_{fu}$  前瞬间时， $\sigma_{cL}$  达最大值。此时

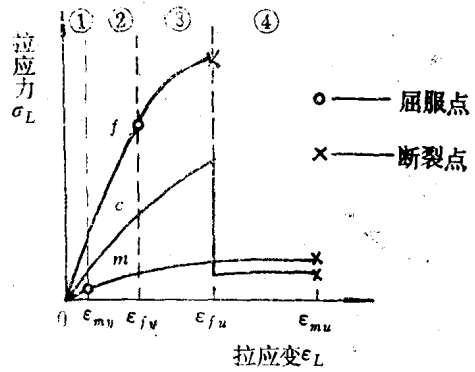


图 2-4 纤维、基体及其增强塑料的应力-应变曲线(纤维和基体都是塑性破坏)

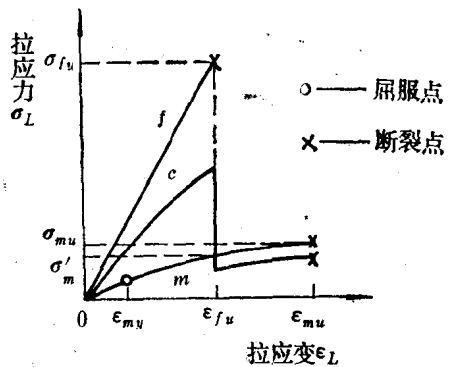


图 2-5 纤维、基体及其增强塑料的应力-应变曲线(纤维脆性破坏、基体塑性破坏)

$$\sigma_{cL} = \sigma_{fu} V_f + \sigma'_m (1 - V_f) = \sigma_{fu} \left[ V_f + \frac{E_m}{E_f} (1 - V_f) \right] \quad (2-7)$$

式中  $\sigma'_m$  为基体的应变等于纤维断裂应变  $\varepsilon_{fu}$  时基体的应力。

纤维断裂后，基体断裂前增强塑料的应力为：

$$\sigma_{cL} = \sigma_m V_m = \sigma_m (1 - V_f)$$

当  $\varepsilon_c$  达到  $\varepsilon_{mu}$  时， $\sigma_{cL}$  又达到一最大值，即

$$\sigma_{cLu} = \sigma_{mu} (1 - V_f) \quad (2-8)$$

在图2-5中的  $\sigma_{cL} - \varepsilon_c$  曲线上可以看到当  $\varepsilon_c$  分别等于  $\varepsilon_{fu}$  及  $\varepsilon_{mu}$  时， $\sigma_{cL}$  有两个极大值。其值可由式(2-7)和(2-8)求得。增强塑料的强度即由此二式确定，即

$$\sigma_{cLu} = \sigma_{fu} \left[ V_f + \frac{E_m}{E_f} (1 - V_f) \right] \quad (2-9)$$

$$\sigma_{cLu} = \sigma_{mu} (1 - V_f) \quad (2-10)$$

并与  $V_f$  有关。 $V_f$  与  $\sigma_{cLu}$  的关系如图 2-6 所示。

在两条直线的交点处可求得一个纤维体积含量  $V_{fmin}$  (将(2-9)和(2-10)式联立求解即可求出)。

$$V_{fmin} = \frac{\sigma_{mu} - \sigma'_m}{\sigma_{fu} + \sigma_{mu} - \sigma'_m} \quad (2-11)$$

当  $V_f < V_{fmin}$  时，即使纤维全部断裂也不会直接导致增强塑料的最终破坏。因为纤维占的比例太小，剩下的基体能够继续承担增大的载荷，一直到增强塑料的  $\varepsilon_c$  达到  $\varepsilon_{mu}$ ，应力  $\sigma_{cL}$  达到  $\sigma_{mu}(1 - V_f)$  时，增强塑料才会最终破坏。 $V_{fmin}$  是增强塑料强度最低时的纤维体积含量，并不是纤维体积含量的最小值。

从图2-6中还可以看到，当  $V_f$  很小时， $\sigma_{cLu}$  有可能小于  $\sigma_{mu}$ 。但是从强度角度考虑，加入纤维的目的是为了使增强塑料的强度高于未增强的纯基体的强度  $\sigma_{mu}$ 。即要使  $\sigma_{cLu} > \sigma_{mu}$ 。因此，把  $\sigma_{cLu} = \sigma_{mu}$  代入式(2-9)即可求出一个临界纤维体积含量  $V_{fcr}$ 。

$$V_{fcr} = \frac{\sigma_{mu} - \sigma'_m}{\sigma_{fu} - \sigma'_m} \quad (2-12)$$

当  $V_f < V_{fcr}$  时，纤维不仅没有增强效果，反而会降低增强塑料的强度。只有当  $V_f > V_{fcr}$  时，增强塑料的强度才高于纯基体的强度。因此，在选定  $V_f$  时，必须使  $V_f > V_{fcr}$ 。

2. 纤维和基体都是脆性材料，并且有  $\varepsilon_{fu} > \varepsilon_{mu}$  的情况。例如，常用的几种玻璃纤维增强热固性塑料，其应力-应变曲线如图 2-7 所示。

玻璃钢受拉伸时，破坏往往是先从树脂开裂起，然后才是纤维断裂。树脂开裂时，在玻璃钢的  $\sigma - \varepsilon$  曲线上出现拐点。此时，并不意味着玻璃钢的最终破坏。因为树脂不是在同一截面上出现开裂，纤维还可以继续承担载荷，直到纤维全部断裂，玻璃钢也同时断裂。所以，玻璃钢的纵向拉伸断裂应变  $\varepsilon_{cLu} = \varepsilon_{fu}$ 。

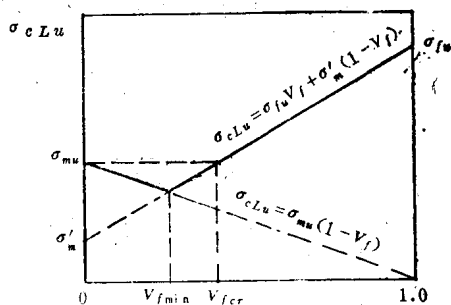


图 2-6 单向增强塑料的纵向拉伸强度  $\sigma_{cLu}$  随  $V_f$  的变化 (纤维脆性破坏、基体塑性破坏)

基体开裂前增强塑料的应力为:

$$\sigma_{cL} = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$$

最大应力为:

$$\begin{aligned} \sigma_{cL} &= \sigma'_f V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f) \\ &= \varepsilon_{mu} (E_f V_f + E_m (1 - V_f)) \end{aligned} \quad (a)$$

式中:  $\sigma'_f$  为纤维的应变  $\varepsilon_f$  等于基体断裂应变  $\varepsilon_{mu}$  时纤维的应力。

基体开裂后纤维断裂前增强塑料的应力为:

$$\sigma_{cL} = \sigma_f V_f$$

最大应力为:

$$\sigma_{cL} = \sigma_{fu} V_f \quad (b)$$

增强塑料的强度  $\sigma_{cLu}$  由式(a)和(b)决定, 即:

$$\begin{cases} \sigma_{cLu} = \varepsilon_{mu} (E_f V_f + E_m (1 - V_f)) & (2-13) \\ \sigma_{cLu} = \sigma_{fu} V_f & (2-14) \end{cases}$$

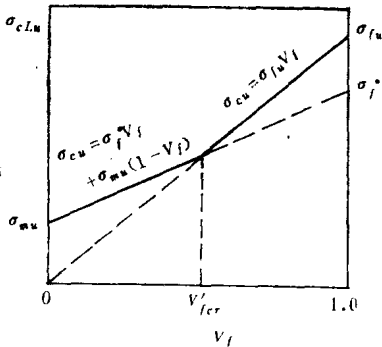


图 2-8 脆性纤维和基体的增强塑料纵向拉伸强度  $\sigma_{cLu}$  随  $V_f$  的变化

$\sigma_{cLu}$  与  $V_f$  的关系如图 2-8 所示。在两直线的交点处可求得纤维体积含量临界值  $V'_{fcr}$ 。

$$V'_{fcr} = \frac{\sigma_{mu}}{\sigma_{fu} - \sigma'_f + \sigma_{mu}} \quad (2-15)$$

当  $V_f > V'_{fcr}$  时, 基体开裂后纤维仍可继续承载直至  $\varepsilon_{fu}$  增强塑料才破坏。因此  $\varepsilon_{cLu} = \varepsilon_{fu}$ 。当  $V_f < V'_{fcr}$  时, 由于纤维含量少, 基体开裂后纤维不能承担全部载荷, 纤维应力很快达到断裂应力  $\sigma_{fu}$ , 纤维断裂, 增强塑料也同时破坏。因此, 可认为  $\varepsilon_{cLu} = \varepsilon_{mu}$ 。

从图 2-8 还可以看出, 不论加入多少纤维都能提高增强塑料的纵向拉伸强度。当  $V_f > V'_{fcr}$  时,  $\sigma_{cLu}$  随  $\sigma_{fu}$  及  $V_f$  的增高而提高, 增强效果较大。当  $V_f < V'_{fcr}$  时,  $\sigma_{cLu}$  不仅取决于  $E_f$  及  $V_f$ , 而且还与  $\varepsilon_{mu}$  有关, 增强效果较低。

从以上两种情况看, 为了取得较大的增强效果, 应该选取纤维的体积含量大于其临界值。此时增强塑料的纵向拉伸强度分别由(2-9)式和(2-14)式确定。由于  $\frac{E_m}{E_f} (1 - V_f)$  很小, 若忽略不计, 则(2-9)式可简化为  $\sigma_{cLu} \approx \sigma_{fu} V_f$ 。即与式(2-14)相同。因此, 增强塑料的纵向拉伸强度可近似地用  $\sigma_{cLu} = \sigma_{fu} V_f$  估算。也就是说纵向拉伸强度主要取决于纤维的强度和体积含量。

混合定律虽然可以较好地反映单向增强塑料的纵向拉伸性能, 但是实测值与计算值之间仍然有差别。这是由于细观力学的假设与实际情况并不完全相符。例如: 纤维不直、互

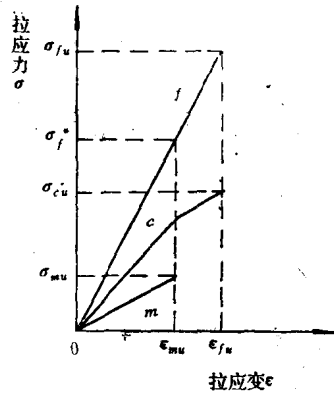


图 2-7 纤维、基体及其增强塑料的应力-应变曲线(纤维和基体都是脆性材料)

相不平行、取向有偏差、强度不均匀、有断头；基体中有孔隙、裂纹；有弱界面；有内应力等。因此，C. C. Chamis提出了一个半经验公式来修正混合定律。其表达式为：

$$\sigma_{cLu} = \sigma_{fu}(\beta_f V_f + \beta_m V_m E_m / E_f) \quad (2-16)$$

式中： $\beta_f$ 和 $\beta_m$ 分别为纤维和基体的理论-实验相关因子。它取决于纤维和增强塑料的生产过程。

## § 2-4 横向拉伸性能

### 一、横向拉伸模量 $E_{cT}$

#### (一) R. M. Jones公式

取横向拉伸时的力学模型为串联模型，如图 2-9 所示。横向宽度为  $t$ ，厚度为  $h$ ，长度为  $l$ 。将纤维简化为方形截面。受拉后，宽度的增量用  $\delta$  表示。脚标  $T$  表示横向值。

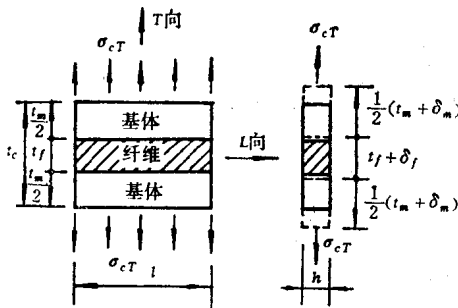


图 2-9 单向增强塑料横向拉伸的力学模型

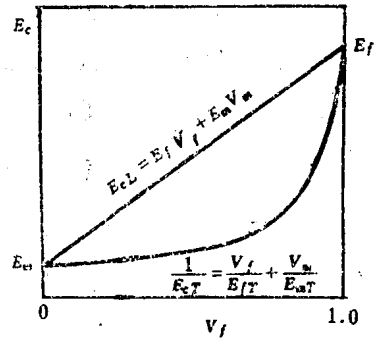


图 2-10 增强塑料的拉伸模量与 $V_f$ 的关系

增强塑料横向拉伸后，其宽度的总增量 $\delta_{cT}$ 为各组分增量之和，即

$$\delta_{cT} = \delta_{fT} + \delta_{mT}$$

亦即

$$\varepsilon_{cT} t_c = \varepsilon_{fT} t_f + \varepsilon_{mT} t_m$$

$$\varepsilon_{cT} = \varepsilon_{fT} \frac{t_f}{t_c} + \varepsilon_{mT} \frac{t_m}{t_c} = \varepsilon_{fT} \frac{t_f l h}{t_c l h} + \varepsilon_{mT} \frac{t_m l h}{t_c l h} = \varepsilon_{fT} V_f + \varepsilon_{mT} V_m$$

由于材料都处于弹性变形范围，即服从虎克定律，所以上式可写成：

$$\frac{\sigma_{cT}}{E_{cT}} = \frac{\sigma_f}{E_{fT}} V_f + \frac{\sigma_m}{E_{mT}} V_m$$

根据等应力假设，即 $\sigma_{cT} = \sigma_f = \sigma_m$ ，上式可化简为

$$\frac{1}{E_{cT}} = \frac{V_f}{E_{fT}} + \frac{V_m}{E_{mT}}, \text{ 或 } E_{cT} = \frac{E_{fT} E_{mT}}{E_{fT} V_m + E_{mT} V_f} \quad (2-17)$$

此即单向纤维增强塑料横向拉伸弹性模量的串联关系混合定律。而纵向拉伸弹性模量的公式(2-3)称为并联关系混合定律。

$$E_{cL} = E_f V_f + E_m V_m$$

二者与 $V_f$ 的关系如图 2-10 所示。从图中可清楚地看到，增强塑料的模量随纤维体含量



$V_f$ 及模量的增加而增大。对纵向模量 $E_{cL}$ 而言,  $E_{cL}$ 随 $V_f$ 的增加呈直线增加。而对于横向模量 $E_{cT}$ , 只有在较高的 $V_f$ 下, 纤维的 $E_{fT}$ 及 $V_f$ 才能对 $E_{cT}$ 产生显著的影响。

将(2-17)式改写为

$$\frac{E_{cT}}{E_{mT}} = \frac{1}{1 - (1 - E_{fT}/E_{mT})V_f}$$

式中:  $\frac{E_{cT}}{E_{mT}}$  称为“增刚系数”或“模量增高系数”, 它表示了增强塑料横向拉伸模量

$E_{cT}$ 比基体模量 $E_{mT}$ 增高的倍数。从图2-11和表2-1中可以清楚地看出 $E_{fT}/E_{mT}$ 及 $V_f$ 对提高 $E_{cT}$ 的贡献。

此法比较简单, 但是力学模型比较粗糙, 与实际情况相差较大, 计算值比实测值偏低甚多。因此, 许多学者从不同角度考虑, 分别提出了不同的力学模型和计算方法。

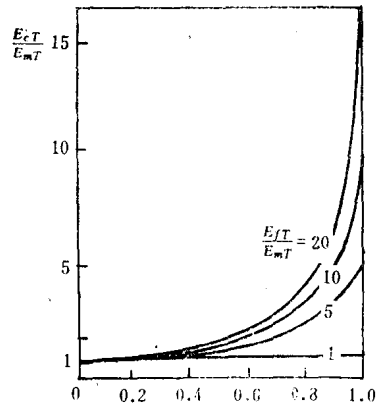


图 2-11  $E_{cT}/E_{mT}$ 与 $V_f$ 及 $E_{fT}/E_{mT}$ 的关系曲线

表 2-1 模量增高系数 $E_{cT}/E_{mT}$ 与 $V_f$ 及 $E_{fT}/E_{mT}$ 的关系

$V_f$ $E_{cT}/E_{mT}$ $E_{fT}/E_{mT}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1	1	1	1	1	1	1
5	1	1.19	1.47	1.92	2.78	5
10	1	1.22	1.56	2.17	3.57	10
20	1	1.23	1.61	2.33	4.17	20
50	1	1.24	1.64	2.43	4.63	50
100	1	1.25	1.66	2.46	4.81	100

### (二) J. C. Ekvall公式

考虑到基体泊松比 $\mu_m$ 的影响, 提出了下列公式:

$$E_{cT} = \frac{E_{fT}E'_{mT}}{V_f E_{mT} + V_m E_{fT}(1 - \mu_m)^2} \quad (2-18)$$

式中:  $E'_{mT} = E_{mT}/(1 - 2\mu_m^2)$ 。

若略去 $\mu_m$ 不计(即 $\mu_m = 0$ ), 则上式即成为(2-17)式。

### (三) 朱颐龄公式

假设纤维呈正方形排列, 并把圆柱形纤维简化为正方柱形纤维, 利用对称性取其中的1/4来计算, 如图2-12所示。不考虑泊松效应, 其力学模型示于图2-13中。分析时采