

# 纤维增强复合材料 实验力学

J. M. 惠特尼

[美] I. M. 丹尼尔 著

R. B. 派斯 著

王弘生 刘万龙 译

刘方龙 校

科学出版社

1990

## 内 容 简 介

本书首次系统地阐述了纤维增强复合材料实验力学的原理和方法。第一章导论,介绍本书的内容特点。第二章叙述复合材料力学的现状,并以此作为试验方法分析的基础。第三章介绍试验中常用的工具,如应变片、光弹性贴片、云纹条纹,以及全息摄影技术等。第四章讨论以力学性能试验方法为主的具体试验方法。第五章研究湿度的影响及其试验技术。

J. M. Whitney I. M. Daniel R. B. Pipes  
EXPERIMENTAL MACHANICS OF FIBER  
REINFORCED COMPOSITE MATERIALS  
Prentice-Hall, 1984

### 纤维增强复合材料实验力学

J. M. 惠特尼

[美] I. M. 丹尼尔 著

R. B. 派卜斯

王弘生 刘方龙 译

刘方龙 校

责任编辑 徐宇星

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1990年4月第一版 开本:787×1092 1/32

1990年4月第一次印刷 印张:8 7/8

印数:0001—1 000 字数:197 000

ISBN 7-03-001644-0/O·328

定价: 8.30 元

## 译 者 的 话

这本由美国实验应力分析学会 (SEM) 出版的专著,是世界上同类著作中的第一本。本书的主要特点是将复合材料和实验力学两方面融为一体,因此必将引起这两方面科技工作者的兴趣和重视。三位作者都是美国复合材料界的知名学者,他们汇集历年来在复合材料试验方面的丰富经验,合作写成此开创性专著。本书自 1982 年第一版问世以来,在美国复合材料学术界与工业界引起了强烈反响。在接连组织的几届讲习班上,三位作者分别主讲有关内容,与会者讨论十分热烈。在吸收了各方面的经验和意见后,对此书进行了局部的修改,并于 1984 年再版发行。本书就是按 1984 年修订后的新版译出的。

复合材料由于其各向异性、非匀质性和不连续性,呈现出极其特别的力学性质。但是,在绝大多数的复合材料及其结构的力学分析中,因受数学上的限制及考虑简化计算等原因,除了考虑其各向异性及因此而产生多耦合效应外,一般皆略去非匀质性和不连续性的影响,这就导致力学分析结果可能与实际的力学行为产生很大的差别。试验的重要性和意义并不只在于验证理论分析的正确性,更主要的还是应该首先通过试验,建立正确的理论分析模型。可惜关于这种正确的研究程序,尚未为所有科技工作者所认识。现借介绍本书的机会,希望能引起对复合材料试验研究的更大重视,也愿国内的有关科技工作者,能从本书得到有益的启示,将复合材料的力学试验方法向前推进一步。

在翻译时考虑到查阅参考文献的方便，书中人名除少数熟知者外，一律保留原文。参考文献也均保留原著中的书写格式。此外，所发现的原著中存在的笔误或印刷错误，已经改正，译本中不再一一注明。

第一、二、四章为刘方龙翻译，三、五两章为王弘生翻译，全书最后由刘方龙校订。

为了方便读者，本书同时给出了国际单位和英制单位；由于考虑到有的读者对英制单位符号不大熟悉，故将英制单位符号译成了中文。

限于水平，译文中不当之处实所难免，欢迎批评指正。

译 者

1987年5月

# 目 录

第一章 导论	1
第二章 复合材料力学	4
§2.1 基本术语	4
2.1.1 应力和应变分量	4
2.1.2 材料主坐标系	5
2.1.3 弹性对称	5
2.1.4 层板	7
§2.2 单层性能估算——微观力学	8
2.2.1 杨氏模量	8
2.2.2 泊松比	9
2.2.3 剪切模量	9
2.2.4 膨胀应变	10
§2.3 应力与应变的转换——平面应力	12
2.3.1 应力转换	12
2.3.2 应变-位移关系	13
2.3.3 应变转换	13
§2.4 应力-应变关系	14
2.4.1 单层的工程材料特性	14
2.4.2 柔度特性	15
2.4.3 刚度特性	16
2.4.4 任意坐标系	17
2.4.5 剪切-耦合现象	19
2.4.6 热弹性应力-应变关系	20
2.4.7 湿与热的相似性	22
§2.5 层板的力学性质	23
2.5.1 层板刚度关系式	23

2.5.2	层板有效工程性能 .....	25
2.5.3	热膨胀系数 .....	28
2.5.4	湿膨胀系数 .....	31
2.5.5	组合膨胀应变 .....	31
2.5.6	层板性能随铺层方向的变化 .....	32
<b>§2.6</b>	<b>复合材料层板的强度 .....</b>	<b>34</b>
2.6.1	单层的机械应力 .....	34
2.6.2	单层的热残余应力和应变 .....	37
2.6.3	单层的强度模型 .....	39
2.6.4	层板强度的估算 .....	44
<b>§2.7</b>	<b>弹性应力集中 .....</b>	<b>44</b>
2.7.1	椭圆孔 .....	45
2.7.2	圆孔 .....	46
2.7.3	中心切口 .....	47
<b>§2.8</b>	<b>带切口复合材料层板的强度 .....</b>	<b>48</b>
2.8.1	断裂力学准则 .....	48
2.8.2	应力断裂准则 .....	50
<b>§2.9</b>	<b>复合材料层板的边界效应 .....</b>	<b>54</b>
2.9.1	边界层的层间应力 .....	54
2.9.2	第一种模型的机理 .....	55
2.9.3	第二种模型的机理 .....	61
2.9.4	铺层顺序对层间应力的影响 .....	64
<b>第三章</b>	<b>实验应变分析 .....</b>	<b>66</b>
<b>§3.1</b>	<b>电阻丝应变片 .....</b>	<b>66</b>
3.1.1	引言 .....	66
3.1.2	温度补偿 .....	66
3.1.3	横向应变片灵敏度 .....	68
3.1.4	应变片电路 .....	71
3.1.5	埋设应变片技术 .....	72
3.1.6	热膨胀测量 .....	74
3.1.7	残余热应力的确定 .....	76
<b>§3.2</b>	<b>云纹法 .....</b>	<b>81</b>

3.2.1	引言 .....	81
3.2.2	常规方法 .....	82
3.2.3	条纹倍增法 .....	84
3.2.4	云纹条纹分析 .....	86
3.2.5	应用 .....	87
3.2.5.1	单向受载的带孔玻璃/环氧层板 .....	87
3.2.5.2	单向受载的带孔硼/环氧层板 .....	92
3.2.5.3	带裂纹的玻璃/环氧层板 .....	95
3.2.5.4	单向受载的带裂纹石墨/环氧层板 .....	98
3.2.5.5	斜交层板的边缘效应 .....	98
3.2.5.6	阴影云纹法的应用 .....	100
3.2.6	讨论 .....	101
§3.3	双折射贴片 .....	103
3.3.1	双折射贴片的原理 .....	103
3.3.2	靠近自由边的限制 .....	104
3.3.3	应用 .....	105
3.3.3.1	带孔的硼/环氧层板 .....	105
3.3.3.2	层板构造的影响 .....	110
3.3.3.3	铺层顺序影响 .....	113
3.3.3.4	孔几何形状的影响 .....	117
3.3.3.5	孔径影响 .....	119
3.3.3.6	带裂纹的单轴受载层板 .....	121
§3.4	全息摄影技术 .....	124
3.4.1	全息干涉测量法 .....	124
3.4.2	应用 .....	126
3.4.2.1	静力受载板 .....	127
3.4.2.2	振动分析 .....	128
3.4.2.3	无损检测 .....	131
3.4.2.4	材料性能 .....	134
§3.5	散斑干涉测量法 .....	134
§3.6	各向异性光弹性-双折射复合材料 .....	135
3.6.1	应力-光学律 .....	135
3.6.2	应变-光学律 .....	137
3.6.3	光学和力学特性 .....	139
<b>第四章</b>	<b>复合材料特性 .....</b>	<b>142</b>

§4.1	组分试验方法 .....	142
4.1.1	单丝拉伸性能 .....	142
4.1.2	聚合物基体拉伸性能 .....	144
§4.2	物理性能试验方法 .....	145
4.2.1	密度 .....	145
4.2.2	纤维体积率 .....	145
4.2.3	热膨胀系数 .....	148
4.2.4	湿膨胀系数 .....	149
§4.3	复合材料试验方法 .....	151
4.3.1	拉伸试验方法 .....	152
4.3.2	弯曲试验方法 .....	157
4.3.3	拉伸和弯曲强度的比较 .....	161
4.3.4	偏轴拉伸试验 .....	163
4.3.5	压缩试验方法 .....	168
4.3.6	剪切试验方法 .....	177
4.3.7	层间梁试验 .....	192
§4.4	复合材料的破坏特性 .....	196
4.4.1	复合材料切口强度 .....	196
4.4.2	第一层破坏 .....	205
4.4.3	双轴加载 .....	211
4.4.4	疲劳加载 .....	219
§4.5	层间断裂力学特性 .....	229
4.5.1	应变能释放率 .....	230
4.5.2	双悬臂梁试验 .....	230
4.5.3	端部切口弯曲试验 .....	239
<b>第五章</b>	<b>潮湿效应</b> .....	<b>242</b>
§5.1	玻璃化转变温度 .....	242
5.1.1	粘弹性特性 .....	242
5.1.2	湿度对玻璃化温度的影响 .....	243
5.1.3	$T_g$ 的测量 .....	244
§5.2	水分扩散 .....	245



5.2.1	水分在复合材料薄层板中的扩散 .....	245
5.2.2	水分测量 .....	247
§5.3	力学性能 .....	248
5.3.1	加速调节 .....	250
5.3.2	端部加强片和应变片 .....	253
5.3.3	水分控制 .....	253
	参考文献 .....	256

# 第一章 导 论

随着在结构中愈来愈多地使用复合材料，也相应地增加了对试验数据的需要，因此，近年来复合材料试验的方法学受到了很大的重视。许多测定金属特性的试验方法，已用于测试纤维增强材料。但是，由于纤维增强复合材料的非匀质性和各向异性，在把从金属试验技术中的试验方法直接用于测定复合材料特性之前，必须对它们进行认真细致地审查。

由于近年来设计上需要的数据相当复杂，需对复合材料试验方法进行严格评定。在复合材料技术发展的初期，试验方法不外乎在简单的拉伸、压缩和剪切载荷下测量强度和刚度。随着结构设计中愈来愈多地使用复合材料，日益需要测定更进一步的特性，诸如切口强度、多轴向载荷下的强度和疲劳寿命。对各种复合材料试验方法所作的一些综述，可以在文献[1]—[5]中找到。

写此专著的目的，是从应用力学的观点来评述纤维增强复合材料的现代试验方法。鉴于复合材料的复杂性，这样处理是适宜的。为此，本书力图在理性基础上介绍复合材料试验的方法学，而不是简单地综述各种试验方法，因此，没有必要讨论所有已知的测试特定性能的试验方法。作者认为，从理论研究角度、个人和其他工作者的经验来看，本书详细介绍的方法，是当前最可行的方法。之所以详细讨论了某些从理论角度看并非最理想的试验方法，例如短梁剪切法，那是因为它运用广泛。介绍的许多方法，或是现行 ASTM 标准，或是当前正考虑列入 ASTM 标准。对某些性能，象抗冲击性之类，目前

还没有研究出好的测试方法,本书不予考虑。

在选择测定某一特定力学性能的最优试验方法中,需要定义什么是一个理想的试验方法。理想的试验方法,就是能在整个试样上产生一种已知均匀应力和应变状态的方法。然而,在现实世界中,试验工作者不得不采用那种在试样加载区应力集中最小而在测量区可得到已知均匀应力和应变状态的方法,作为“最佳”方法。由于在高度正交异性材料的试验中<sup>[6]</sup>,圣·维南(St. Venant)原理不适用,确定复合材料均匀应力和应变区的问题就变得复杂了。特别是,为消除加载影响,可能要把正交异性材料的试样做得比各向同性材料的长得多。在设计试样的几何尺寸时,必须考虑到这点。

尽管本书中介绍的许多试验方法都适用于各式各样的复合材料,但却明显地侧重于航空航天用的材料。这主要是由于近几年来大多数的技术在这方面一直处于领先地位。

第二章叙述了复合材料力学的现状,所介绍理论的基础是虎克定律。虽然在工程复合材料中,尤其在单向材料的偏轴和剪切特性曲线中,观察到一些非线性特性,但是大多数现行的复合材料力学,都以线弹性特性为基础。单向复合材料在室温条件下,沿平行和垂直于纤维这两个方向,通常都观察到线性应力-应变特性曲线,而剪切特性曲线则有明显的非线性。在室温下,观察到许多层板的非线性应力-应变特性曲线,大多是伴随损伤(往往是基体裂纹)出现的。这类特性将在第四章中同第一层的破坏一起讨论。在高温下,可以观察到非线性的和与时间相关的应力-应变特性曲线,它与受基体控制的特性有关。然而作者认为,对非线性的和(或)与时间相关的应力-应变特性的正式研究,超出了这本复合材料实验力学初等专著的范围。这些特性可以构成这个领域内另一本专著的基础。第二章中介绍的概念将成为以后各章试验方法

分析的基础。

实验工作者的工具,如应变片、光弹性贴片、云纹条纹以及全息摄影技术,在第三章中讨论。虽然这些技术与金属试验的类似,但它们对纤维增强复合材料的适用性,必须给予特别的研究。

第四章讨论具体的试验方法,着重于力学性能而非物理性能。除了面内剪切外,此章对各有关性能测试方法,进行了相当全面的综述。剪切性能是很难用试验测定的,因为实际上不可能设计出一个试样,使其测量区只产生纯剪切,而其余部分没有显著的应力集中。因此,已研究出或提出了许多剪切试验方案。本书所讨论的方法是基于理论研究得到的、现正在使用并得到大家认可的。另外一些具有历史意义的方法,如 Douglas 开裂环试验<sup>[7]</sup>、十字型夹芯梁试验<sup>[8]</sup>、图框剪切试验<sup>[9]</sup>以及薄片扭转试验<sup>[10]</sup>,本书均未收入。

湿度对复合材料的影响和相应的试验技术,在第五章中讨论。由于近来关于湿度对全部聚合物基体(特别是环氧树脂)复合材料的影响日益受到关注,因而在本书中收集了这类材料。在文献中有关湿度对力学性能影响的某些数据是不正确的,为了避免引用错误的数据和相应的错误结论,必须对水分扩散的机理要了解。

本书对大学生、研究人员和那些对纤维增强复合材料试验方面感兴趣的工程技术人员都有助益。此外,希望读者以应用力学中的正确原理来评价试验方法,以免盲目地把匀质各向同性材料的方法,不问其是否适用,就用到非匀质的各向异性复合材料上去。

## 第二章 复合材料力学

### § 2.1 基本术语

在宏观上含有两种或两种以上不同相的材料，称为复合材料。我们要讨论的是受粘结剂或基体材料支持的纤维增强材料。在工程应用中，大多以层板的形式使用这些材料，而层板则由各种复合材料的单层组成。这些单个的层是由单向连续纤维、单向不连续纤维或织布构成的。为了识别层板中每层相对于材料主坐标系的材料性质以及层板铺叠的几何性质，需要有一套明确的术语。又因我们将不断地谈到复合材料的应力、应变和弹性性质，所以为这些量建立一套协调一致的术语也很重要。

#### 2.1.1 应力和应变分量

假定有一直角坐标系  $x_1, x_2$  和  $x_3$ 。应力张量用  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) 表示，其中第一个下标表示此应力分量作用面的法线方向，第二个下标表示此应力分量的方向。这样，就由重号下标表示正应力，而剪应力则用混合下标表示。应变张量用  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) 表示，其下标的含义与应力张量相同。

应力和应变张量都是对称的，即

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}, \quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2.1)$$

因此，应力和应变分量的数目就从 9 个减少为 6 个。在实际应用中，应力和应变的剪切分量最好用工程符号而不用张量符号。具体地说，工程符号由下式给出

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{2} \quad (i \neq j) \quad (2.2)$$

也采用下列缩写符号

$$\sigma_{ii} = \sigma_i, \quad \varepsilon_{ii} = \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2.3)$$

$$\tau_{23} = \sigma_{23} = \sigma_4, \quad \gamma_{23} = 2\varepsilon_{23} = \varepsilon_4 \quad (2.4)$$

$$\tau_{13} = \sigma_{13} = \sigma_5, \quad \gamma_{13} = 2\varepsilon_{13} = \varepsilon_5 \quad (2.5)$$

$$\tau_{12} = \sigma_{12} = \sigma_6, \quad \gamma_{12} = 2\varepsilon_{12} = \varepsilon_6 \quad (2.6)$$

### 2.1.2 材料主坐标系

复合材料层板是由含单向纤维或编织布的单层构成。在一个单向层中,分别平行和垂直于纤维的  $x_1$  与  $x_2$  轴系,称为材料的主坐标系。在每层中,纤维相对于层板  $x$  轴的方位,用  $\theta$  表示(见图 2-1)。对于编织布,  $x_1$  和  $x_2$  方向分别是编织布的经线和纬线方向。

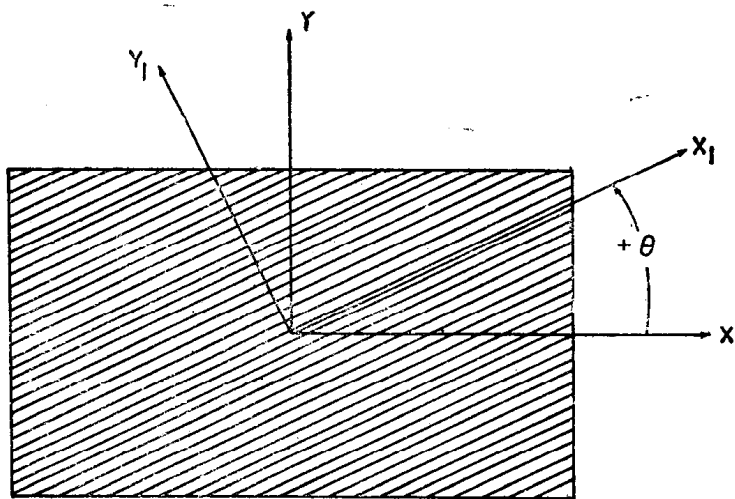


图 2-1 单向层中材料主轴的方向

### 2.1.3 弹性对称

描述一单向复合材料的弹性常数,其数目是堆积形状的

函数。典型的堆集形状如图 2-2 所示。对图 2-2a 所示的矩形堆集,描述其特性需要 9 个弹性常数: 3 个分别平行于  $x_1$ ,  $x_2$  和  $x_3$  轴的杨氏模量  $E_1$ ,  $E_2$  和  $E_3$ ; 3 个分别与  $x_1x_2$ ,  $x_1x_3$  和  $x_2x_3$  面内剪应变相关的剪切模量  $G_{12}$ ,  $G_{13}$  和  $G_{23}$ ; 以及 3 个主泊松比  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$  和  $\nu_{23}$ 。泊松比中第一个下标表示单轴向拉伸应力的方向,第二个下标表示计量收缩的方向。在本章的下一节中将证明: 次泊松比  $\nu_{21}$ ,  $\nu_{31}$  和  $\nu_{32}$  不是独立常数。

对于图 2-2b 所示的方形堆集,很容易从对称关系证明

$$E_3 = E_2, G_{13} = G_{12}, \nu_{13} = \nu_{12} \quad (2.7)$$

因此,独立弹性常数的数目便减少到 6 个。对图 2-2c 所示的六角形堆集,  $x_2x_3$  平面是一各向同性面,在该平面中下述经典

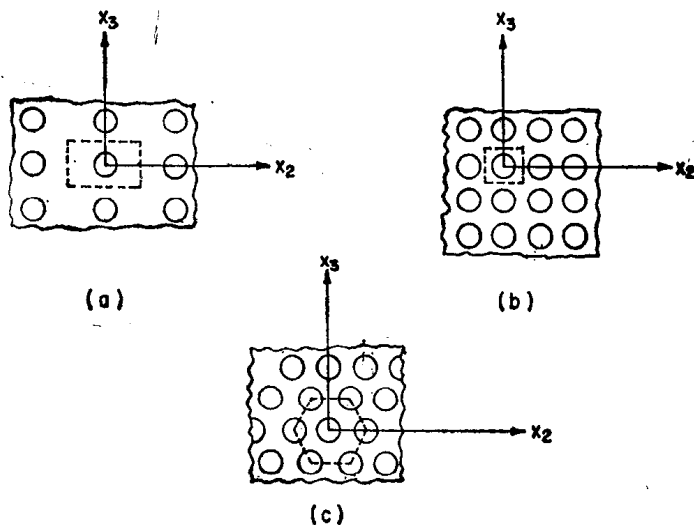


图 2-2 单向纤维堆集的几何形状:

(a) 矩形排列, (b) 方形排列, (c) 六角形排列

的各向同性的关系成立

$$G_{23} = \frac{E_3}{2(1 + \nu_{23})} \quad (2.8)$$

这样的材料叫做横观各向同性的,它的独立弹性常数只有5个。玻璃纤维和石墨纤维在成型过程中趋向于挤在一起,因而形成六角形堆集和5个独立弹性常数。

本书的其余部分,主要讨论材料的平面特性。因此,实际上关心的仅仅是单层平面弹性常数  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$  和  $\nu_{12}$ , 与堆集形状无关。

#### 2.1.4 层板

复合材料层板,是将若干单向的或编织的单层纤维复合材料,与层板  $x$  轴成各种不同角度铺叠而成。为了描述复合材料层板的铺叠几何形状,必须有一个确切无误地描述层板的标记。如各单层的厚度相等,就可以单从顶部到底部列出单层方向  $\theta$  来说明铺层顺序。因此,符号  $[0/90/0]_T$  唯一地表示一个3层层板。下标  $T$  表示这顺序是针对总层数而言的。如果层板是对称的,譬如  $[0/90_s/0]_T$ , 则其符号可缩写为  $[0/90]_s$ 。下标  $s$  表示该铺层顺序是对层板中心线对称重复的。在总铺层顺序符号中的下标 2, 表示  $90^\circ$  层是 2 层。  $[0/45/-45]_s$  表示对称斜交层板,它也可以缩写成  $[0/\pm 45]_s$ 。对于铺层成组重复的层板,例如  $[0/\pm 45/0/\pm 45]_s$ , 其缩写形式为  $[0/\pm 45]_{2s}$ 。如果有一层在对称层板的中心线上被划分为两半,则在中心层的上面加一横线表示这种划分。例如层板  $[0/90/0]_T$  可以缩写为  $[0/\overline{90}]_s$ 。

这里讨论的符号,与美国空军设计指南<sup>[4]</sup>和 ASTM (美国试验和材料学会)的标记是一致的。



## § 2.2 单层性能估算——微观力学

“微观力学”一词是指单向复合材料的分析，通过分析，便可用各组分材料的性质、几何排列和相对体积来表示等效的单层性能。这样的分析往往很复杂，需要用近似的数值方法才能求得解答。但是，已经推导出的许多闭合形式的近似关系式，可用来从组分材料的性质估算单层的性能。下面将介绍的这些关系式，适用于正交异性的组分材料。由于石墨纤维是正交异性的，这种一般性关系式很有实用价值。

### 2.2.1 杨氏模量

对于连续纤维的复合材料，平行于纤维方向的杨氏模量  $E_1$ ，可以用简单的混合律来估算<sup>[2]</sup>，即

$$E_1 = E_{1f}V_f + E_{1m}(1 - V_f) \quad (2.9)$$

式中  $E_{1f}$ 、 $E_{1m}$  和  $V_f$  分别为纤维的纵向杨氏模量、基体的纵向杨氏模量和纤维体积所占的百分比。对于不连续纤维，但纤维为定长  $b$  的单向复合材料，(2.9) 式变成<sup>[3]</sup>

$$E_1 = \frac{E_{1m}[1 + 2(b/d)\eta_1V_f]}{(1 - \eta_1V_f)} \quad (2.10)$$

式中： $d$  是纤维直径，而

$$\eta_1 = \frac{(E_{1f}/E_{1m} - 1)}{[E_{1f}/E_{1m} + 2(b/d)]} \quad (2.11)$$

注意，当  $b/d$  非常大时，方程 (2.10) 就简化成混合律给出的 (2.9) 式。

无论纤维是连续或不连续的复合材料，其横向杨氏模量  $E_2$  都可用下式<sup>[3]-[5]</sup>估算

$$E_2 = \frac{E_{2m}(1 + \xi\eta_2V_f)}{1 - \eta_2V_f} \quad (2.12)$$

式中