

HUNZA
ELPHECAILIAO

余顺海 唐羽章 编著

混杂复合材料

国防科技大学出版社

目 录

第一章 概述

- §1.1 混杂复合材料..... 1
- §1.2 混杂复合材料特点及典型混杂体系..... 3
- §1.3 发展及应用概况..... 5

参考文献

第二章 一般力学性能和热性能

- §2.1 混杂复合材料所采用的增强材料和基体材料
的主要力学特性..... 8
- §2.2 单向纤维混杂复合材料的一般力学性能.....10
- §2.3 偏轴及角度铺迭的混杂复合材料的力学
行为.....32
- §2.4 混杂复合材料的热性能.....34

参考文献

第三章 混杂效应

- §3.1 混杂效应的含义.....42
- §3.2 混杂效应的表现形式.....43
- §3.3 混杂效应的机理.....45

参考文献

第四章 混杂复合材料的冲击韧性与疲劳强度

- §4.1 概述.....54
- §4.2 复合材料冲击韧性的一般表征.....56
- §4.3 高速冲击载荷下复合材料的本构关系.....59

§4.4	复合材料断裂特征及其描述·····	73
§4.5	复合材料的冲击损伤·····	75
§4.6	几种混杂复合材料的Charpy 冲击试验 研究结果·····	80
§4.7	混杂复合材料的疲劳性能·····	91

参考文献

第五章 混杂复合材料的环境降解

§5.1	环境降解、寿命及可靠性的概念·····	104
§5.2	基体树脂的环境降解·····	107
§5.3	化学物质对纤维的攻击·····	115
§5.4	化学物质对混杂结构中其它成份的攻击·····	118
§5.5	环境对界面的影响·····	118
§5.6	湿热对复合材料性能的影响·····	119
§5.7	环境对混杂复合材料的影响及设计耐环境 降解混杂材料的一般原则·····	130
§5.8	天候对混杂复合材料的影响·····	138
§5.9	混杂复合材料的燃烧及烧蚀特性·····	141

参考文献

第六章 混杂复合材料的应力分析与设计

§6.1	应力分析·····	146
§6.2	结构分析·····	155
§6.3	材料设计·····	156

参考文献

第七章 混杂复合材料制作工艺

§7.1	概述·····	184
§7.2	对模模压法·····	186
§7.3	真空袋/高压釜模塑法·····	189

§7.4	拉挤法·····	191
§7.5	缠绕法·····	194
§7.6	夹芯结构中的粘接技术·····	199

第八章 混杂复合材料试验

§8.1	引言·····	200
§8.2	通过试验确定的复合材料性能数据·····	202
§8.3	混杂复合材料组份含量的测定·····	204
§8.4	FRP及混杂复合材料力学性能试验方法·····	206
§8.5	FRP及混杂复合材料热性能试验方法·····	218
§8.6	介电性质及其测量·····	221
§8.7	本章小结·····	222

参考文献

第九章 混杂复合材料的应用

§9.1	引言·····	224
§9.2	结构设计指导思想·····	227
§9.3	混杂复合材料应用实例·····	247

参考文献

附录一	接触定律·····	259
附录二	复合材料中的应力波·····	262
附录三	55%碳纤维/环氧复合材料应力—应变系数·····	268
附录四	若干材料中的应力波参数·····	269

第一章 概 述

§ 1.1 混杂复合材料

复合材料是由两种或两种以上原材料所构成的多相体系。最先应用并研究较多的是两相体系，通常称为普通复合材料，它既保持了原材料所具有的性能，又具有原材料所不具备的新特点，并可根据需要进行设计。这种材料较单一均质材料向前迈出了关键的一步，而混杂复合材料则是由两种或两种以上普通复合材料所构成，可称得上是“复合材料的复合材料”，故它属于复合材料的一种特殊类型，或者说是复合材料发展的更高级阶段。

复合材料的最大特点是性能的可设计性。当增加其组成相时，可设计的自由度增大，因而混杂复合材料获得其组成材料所不具备的优异综合性能的可能性增大。但这是以合理的设计为前提条件的，如果设计得不好，混杂后的性能也可能比不上未混杂的普通复合材料。

混杂复合材料在受力的结构件上使用最多，它常常是由两种增强材料（一般为两种纤维）混杂于一种基体中所构成，而基体的混杂不包括在本书所讨论的混杂复合材料之内。本书虽然着重讨论两种增强纤维所构成的混杂体系，但所阐明的原理也适用于两种以上增强纤维所构成的混杂体系。

目前，混杂复合材料还没有一个统一的分类方法，以下为

一种较易为人们所接受的分类法^[1]。

1. 层内混杂复合材料(Intraply)—A 型

由两种纤维按某种比例均匀地分散在同一基体中而构成的材料。

2. 层间混杂复合材料(Interply)—B 型

由两种不同的单纤维复合材料层以不同的比例及方式交替地铺迭在一起所构成的材料。

3. 夹芯结构(Core/Shell)—C 型

由一种单纤维复合材料芯层(core)和另一种单纤维复合材料表层(shell)所组成的材料。在力学分析中可以看成是一种结构。

4. 层内/层间混杂复合材料(Intraply—Interply)—AB 型

5. 超混杂复合材料(Surperhybrid)—D 型

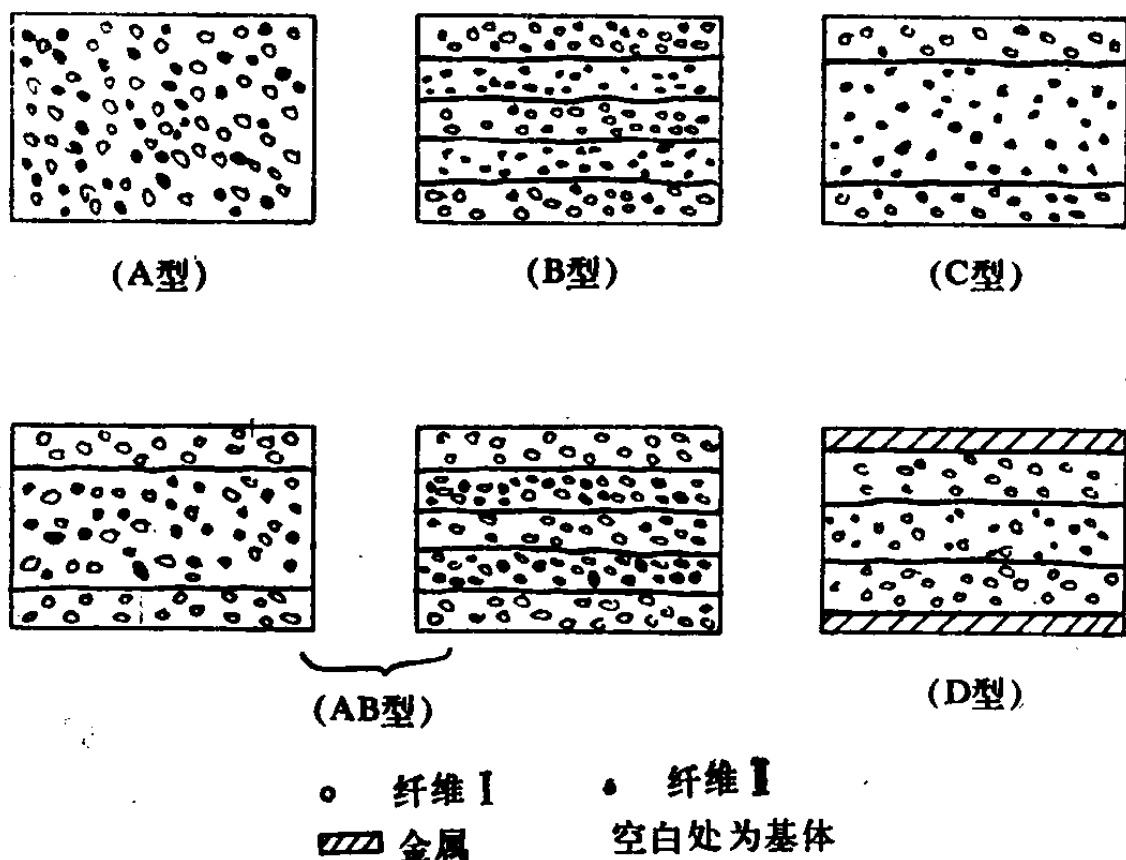


图 1-1 混杂复合材料示意

由金属材料、各种单一复合材料（包括蜂窝夹芯、泡沫塑料夹芯等）所组成的材料。它同时也是一种结构。

上述几种混杂复合材料示意图见图 1-1。

§ 1.2 混杂复合材料的特点及典型混杂体系

这里所讨论的混杂复合材料是两种普通纤维复合材料所构成的。人们总是希望将两种普通纤维复合材料综合于一体后，能使它们相互取长补短，以便获得更好的综合性能（包括成本）来满足工程上的需要。事实上，通过合理的材料设计，不少混杂复合材料的确在不同程度上达到了这种目的。同时，针对不同的使用条件，采用不同的纤维及混杂方式，可以使材料的某单项性能指标达到最大值。例如，在给定的原料比下，CFRP/GFRP/CFRP 混杂复合材料夹芯结构梁的弯曲刚度较其它结构形式的高。

由于混杂效应的存在，混杂纤维复合材料的某些性能优于两种普通纤维复合材料按混合定律的估算值（关于混杂效应将在第三章中讨论）。

归纳起来，通过合理设计，混杂复合材料可能获得下列优点：

1. 冲击强度和断裂韧性显著提高

普通碳纤维/环氧复合材料的冲击强度很低，该材料在冲击载荷下呈明显的脆性破坏模式，在复合材料系统中属脆性材料。若将该材料中 15% 的碳纤维用玻璃纤维代替，构成“碳—玻/环氧”混杂复合材料，其冲击强度可以增加二至三倍^[2]。

2. 相对于高级单纤维复合材料，混杂纤维复合材料的成本明显降低

高级单种纤维复合材料的增强材料称为高级增强材料，如

碳纤维、硼纤维、碳化硅纤维等，这些纤维的模量比普通玻璃纤维约高出一个数量级，但价格比玻璃纤维高数十倍至数百倍，故用这些纤维制作的复合材料价格十分昂贵，况且其综合性能并不理想，若将少量的高级增强纤维以合理的方式加入到一般纤维复合材料中，则可能得到综合性能好的混杂复合材料，而成本却大大降低。

3. 提高疲劳强度

相对于普通纤维复合材料，如 GFRP，混杂复合材料的疲劳强度大有改善，在某些特定纤维含量及铺迭形式下，混杂纤维复合材料的疲劳强度高于构成它的普通复合材料中的最高者（见第四章）。

4. 改善刚度性能

一般而言，高级增强纤维均具有高模量，它的加入可使普通纤维复合材料的刚度大为提高，夹芯结构的混杂复合材料更是如此。故可用它制得不易失稳破坏的大面积无支撑的薄板和薄壳。

5. 特殊的热膨胀性能

有些高级增强纤维，如石墨纤维、芳纶，沿纤维轴向具有负的热膨胀系数，用这些纤维和具有正的热膨胀系数的纤维混杂，可以获得预定热膨胀系数，甚至零膨胀系数的复合材料。前者和热膨胀系数相同的材料构成结构件时，可以避免热应力的不利影响，后者在计量仪器及通讯卫星等领域具有广阔的应用前景。

总之，通过优化设计，混杂复合材料可以具有上述一种或数种优点，而且还可具有其它未列出的优良性能。

目前，已得到广泛应用的混杂复合材料体系主要有碳纤维—玻璃纤维/环氧树脂，简记为“碳—玻/环氧”（以下类同）；

“碳—芳纶/环氧”；“硼—芳纶/环氧”；“玻璃—芳纶/环氧”；泡沫塑料及蜂窝夹芯结构；纤维复合材料—金属超混杂体系；热塑性树脂基及其它热固性树脂基混杂材料。

§ 1.3 发展及应用概况

40年代玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂的出现，标志着复合材料由古老的原始复合材料迈入到现代复合材料的新阶段。此后，玻璃纤维进一步改善和各种树脂相继问世，特别是60年代表面处理剂的出现，使玻璃纤维复合材料发展到相当完善的地步，在航空、造船、电气、化工等部门得到了广泛的应用。但随着技术进步对制件性能要求的提高，日益显现出玻璃纤维的致命弱点，即杨氏模量太低（比一般钢材约低一个数量级）。研究表明，从调整成分使玻璃纤维模量进一步提高相当困难，且成本太高。这就阻碍了它在刚度要求较高的结构件（如飞机的机翼、尾翼、导弹的尾翼等构件）上的应用。为了解决这一矛盾，研制出了聚丙烯腈(PAN)基碳纤维，用它制作的聚合物基复合材料的模量可以接近或超过一般金属材料，其比刚度和比强度为一般金属材料所不及，但缺点是性脆和价格高。硼纤维等高级纤维复合材料也都有这两种弱点。于是，人们自然想到混合采用碳纤维、玻璃纤维共同增强树脂，可能得到既具有高的比强度、比刚度，又具有好的断裂韧性的混杂复合材料。实践表明，这种思路是正确的。最早研制出的混杂纤维复合材料是“碳—玻/环氧”复合材料，此后，又出现了其它类型的混杂复合材料。

混杂复合材料的许多优点导致了它在许多领域里得到了成功的应用。航空方面应用最成熟的例子是直升飞机旋翼^[3]。和金属旋翼相比，混杂复合材料旋翼的使用寿命延长了很多。

另外，它还可以避免灾难性脆断而引起的机毁人亡事故，并能克服金属材料难以克服的动强度与外形设计要求的矛盾，从而简化了加工工艺。另外，飞机蒙皮、垂直和水平尾翼、起落架护板和门舱^[4]、涡轮发动机叶片和盒形梁均有用混杂复合材料制作的例子。国产混杂复合材料制作的垂直尾翼也通过了技术鉴定。

在宇航方面，混杂复合材料曾作为导弹头部防热材料，再入时还可抵抗外物冲击。这种材料所具有的优异抗冲击性能还导致了它在武器装备及防护材料方面的应用，从主战坦克炮塔到士兵的防弹头盔，混杂复合材料均可大显身手。

为了节省能源，商用车辆日趋“塑料化”。目前汽车承力部件也向复合材料发展，例如混杂复合材料板簧和驱动轴已装备车辆进行道路试验^[5]，和金属板簧相比，节省重量达70%。

混杂复合材料在外科整形手术方面可作人造骨骼^{[6][7]}，在外科治疗与护理方面可作为外部支撑系统，用它可以节省重量百分之六十，这给骨骼系统有生理缺陷的人（如小儿麻痹症患者）带来了福音。

另外，在体育运动器具和民用建筑领域，混杂复合材料也崭露头角。随着碳纤维等高级增强纤维价格的下降，混杂纤维复合材料可望在国防及国民经济各个部门得到更加广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] C.C. Chamis and R.F. Lark, Hybrid and Select Metal Matrix Composites—A State of the Art Review (ed. W.J. Renton), AIAA, NY, 1977, pp13-51

- [2] 宋煥成、崔盛瑞、余順海，“碳—玻/环氧”混杂复合材料几个力

学行为的估算与试验, 复合材料研究进展, 航空材料编辑部 第二届全国复合材料年会论文选编。

- [3] M. J. Salkind, The Twin Beam Composite Rotor Blade, Fiber Science and Technology, Vol 8, No.2 April, 1975, pp 95-102
- [4] 张学忠、詹美珍、倪荣根, 碳纤维/玻璃纤维混合复合材料及其应用, 复合材料研究进展, 航空材料编辑部第二届全国复合材料年会论文选篇。
- [5] C.K.H. Dharan, Composite Materials in Automobile Industry, ASME, 1978, pp 19-33
- [6] G. R. Johnson, Orthopaedic Engineering, Proc. Orthop. Eng. Conf., Oxford Sept 1977, pp 260-4
- [7] E.E. Harris, Orthot. Prosthet., 27, 1973, 6-10

第二章 一般力学性能和热性能

尽管混杂复合材料在复合材料领域中还是比较年轻的分支，但它却是研究得最活跃的一个前沿。在这方面，材料科学工作者已经进行了大量的研究工作，特别在诸如拉伸、压缩、弯曲及剪切等一般力学性能方面进行了更多的工作，取得了比较丰富和可靠的数据，这些数据为使用混杂复合材料的设计部门提供了有用的信息。

§ 2.1 混杂复合材料所采用的增强材料和基体材料的主要力学特性

前一章已经指出，混杂纤维复合材料由两种或两种以上增强纤维和一种基体所构成。一般说来，这两种增强纤维中，有一种是杨氏模量高（接近或超过金属材料的杨氏模量）、断裂延伸率低（ $\varepsilon_b \leq 1\%$ ）的高级增强纤维，这种纤维常表现出高的脆性。另一种一般是普通增强纤维，其断裂延伸率、强度和韧性均较高，其模量一般比金属材料低约一个数量级。

图 2-1 是混杂复合材料目前常用的增强纤维的应力—应变图。可以看出：断裂延伸率在 1% 以内的是高模量碳纤维、硼纤维、高强度碳纤维、T-300 或 AS 碳纤维；断裂延伸率超过 2% 的是普通增强纤维，而 Kevlar 纤维断裂延伸率在 1%~2% 之间。这些纤维的拉伸强度在 1.72-3.44GPa 之间，拉伸模量在 400-700GPa 之间，由它们构成的混杂复合材料基本上可以

足目前工程设计的要求。

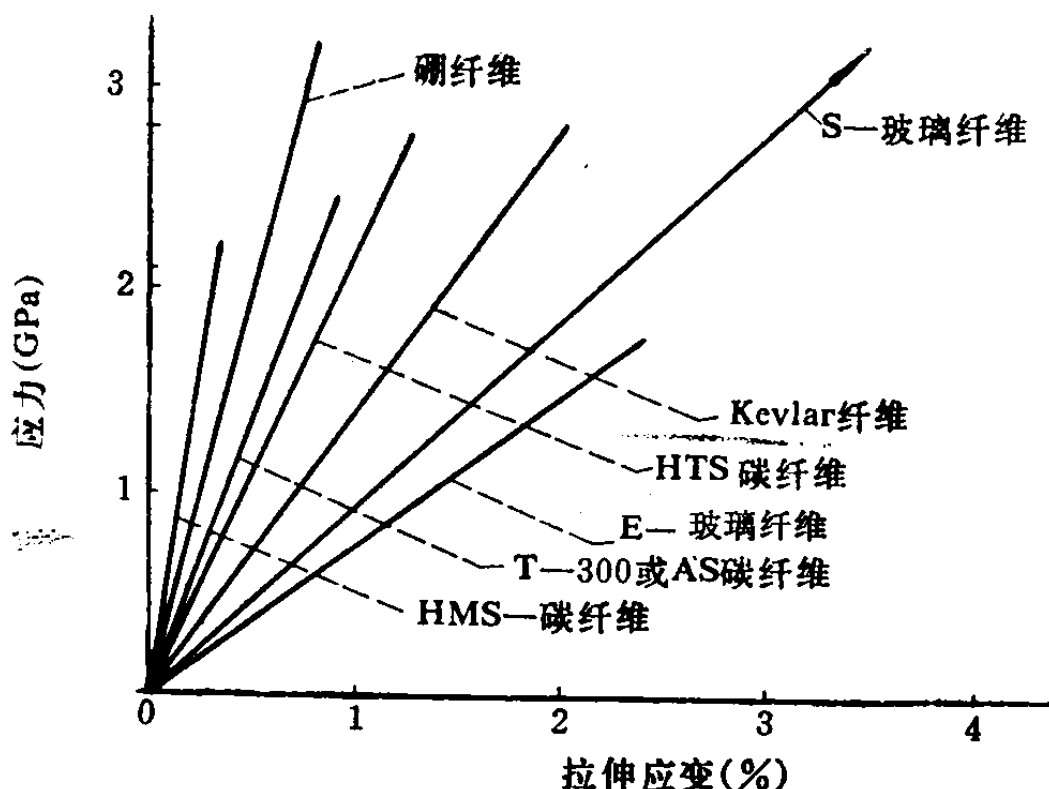


图 2-1 各种纤维应力—应变图（杜邦公司测试结果）

通常用于混杂复合材料的是中模量环氧树脂，其它的热固性树脂和热塑性树脂亦可作为混杂复合材料的基体材料。选用中模量环氧树脂，是因为这种树脂既有较好的韧性，又有较高的刚度，这样就能保证基体能有效地传递载荷和均衡载荷，并保证混杂复合材料耐温性不致过低。一般说来，高模量的环氧树脂太脆，对提高混杂复合材料的断裂韧性不利，而低模量树脂交联密度低、交联点间的分子链段较长，不易在增强材料和基体材料间的界面上形成能有效传递载荷的刚性硬膜，同时，界面粘接层也易为环境介质所破坏。高模量、中模量及低模量环氧树脂的应力—应变曲线如图 2-2 所示^[1]。

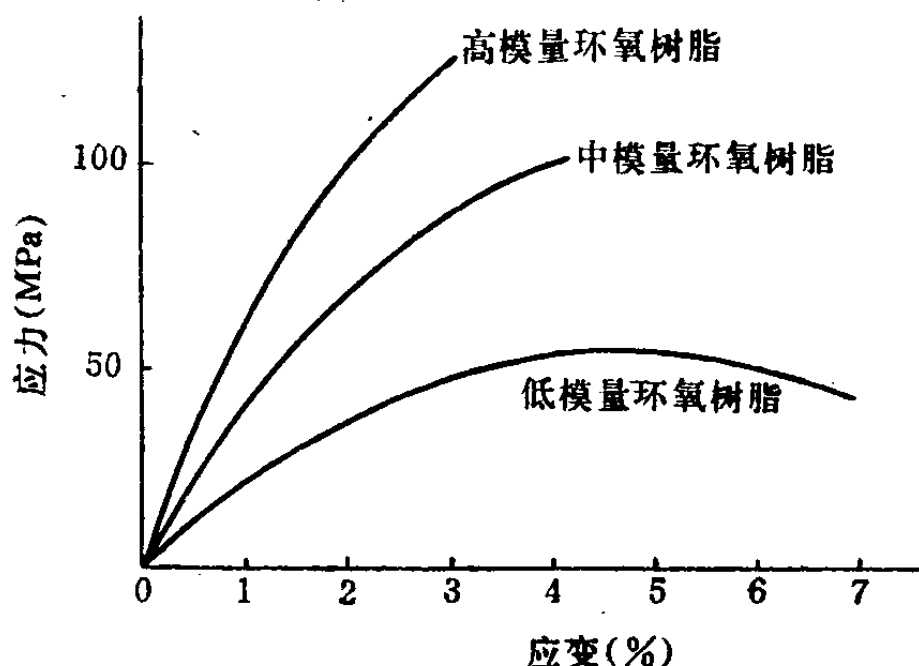


图 2-2 环氧树脂基体应力—应变曲线

§ 2.2 单向纤维混杂复合材料的一般力学性能

单向纤维混杂复合材料是混杂复合材料中最简单的一种类型，弄清它的力学性能与材料组成及铺迭顺序的关系，无疑有助于分析各种不同角度迭层的混杂复合材料的力学性能。因此，我们先讨论单向纤维混杂复合材料的力学性能，然后对各种迭层的混杂复合材料的力学性能分别作简要介绍。

目前应用的混杂纤维复合材料大部分是由单种纤维预浸片 (Single Fiber Preprag) 压制而成的 B 型及 C 型混杂体系，A 型混杂纤维复合材料常用在理论研究上。另外，各种混杂纤维织物也已投放市场。本节主要介绍 B 型及 C 型混杂纤维复合材料的组份含量，特别是两种纤维相对于总纤维体积的百分含量及铺迭顺序与某些力学性能的关系。弄清楚这些关系，特别是它们的影响机理，将有助于指导混杂纤维复合材料的设计。

一、拉伸性能[2]

1. 拉伸模量

因为面内刚度与铺迭顺序无关，所以，A、B、C型混杂纤维复合材料在基体含量 V_m 和两种纤维相对含量相同的情况下，拉伸模量应该相等，并符合混合定律。

以“碳—玻/环氧”混杂纤维复合材料为例，设基体对复合材料模量的贡献可以略去不计(因为基体模量 $\ll$ 纤维模量)，则 0° 方向(沿纤维轴向)模量的混合定律表达式为：

$$E_{Ht} = (1 - V_m)(E'_c V_c + E'_g V_g) \quad (2-1)$$

式中， E_{Ht} 为混杂纤维复合材料的拉伸模量； V_m 为混杂纤维复合材料中基体的体积分数； V_c 、 V_g 分别为碳纤维、玻璃纤维的相对体积分数($V_c + V_g = 1$)； E'_c 、 E'_g 分别为碳纤维、玻璃纤维的拉伸模量。

图 2-3 是据式(2-1)计算所得的单向混杂纤维复合材料拉

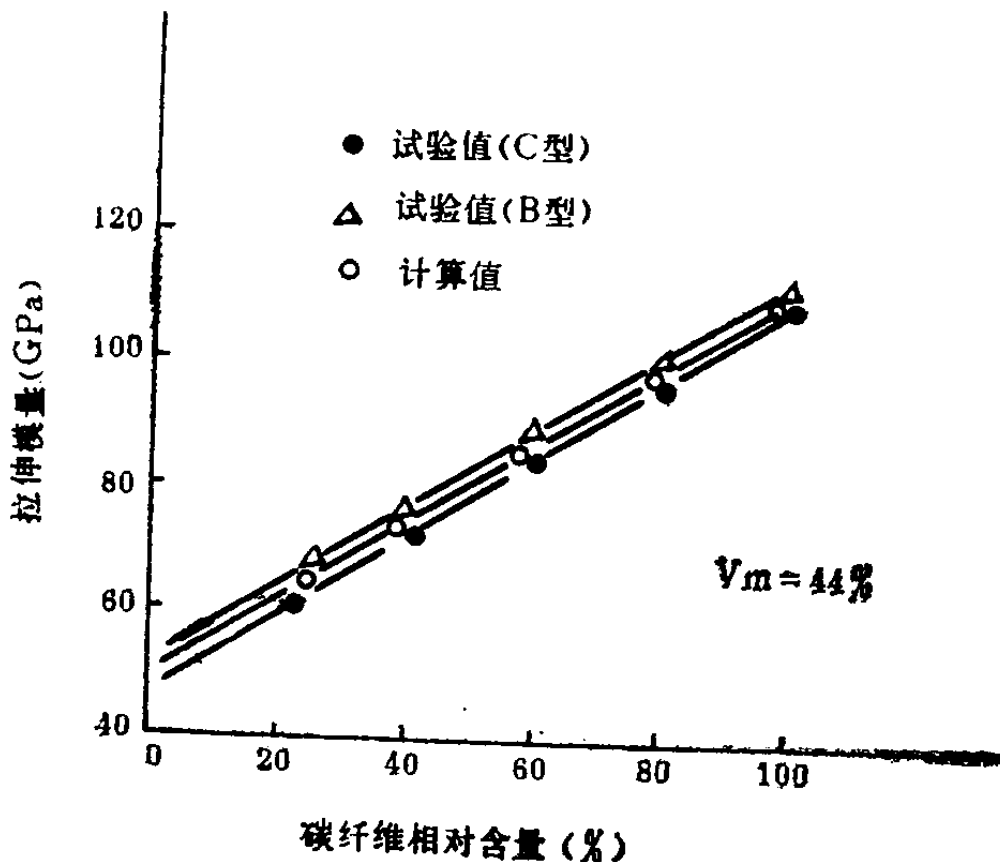


图 2-3 单向纤维混杂复合材料的拉伸模量(0°)与纤维相对含量关系

伸模量值与试验值的对比关系，可以看出，计算值和试验值十分接近。

图 2-4^[3]是层间混杂的单向复合材料横向(90°)的 应力—应变图。可以清楚地看出以下两点：

- ① 单向纤维混杂复合材料横向拉伸模量高于树脂基体的拉伸模量。其原因是玻璃纤维和碳纤维横向模量均高于基体的模量。
- ② 随着碳纤维相对含量增高（即玻璃纤维相对含量下降），横向拉伸模量下降，这可能是由于玻璃纤维表面上的树脂抑制层（拘束层）比碳纤维表面上的树脂抑制层交联更紧密引起的。

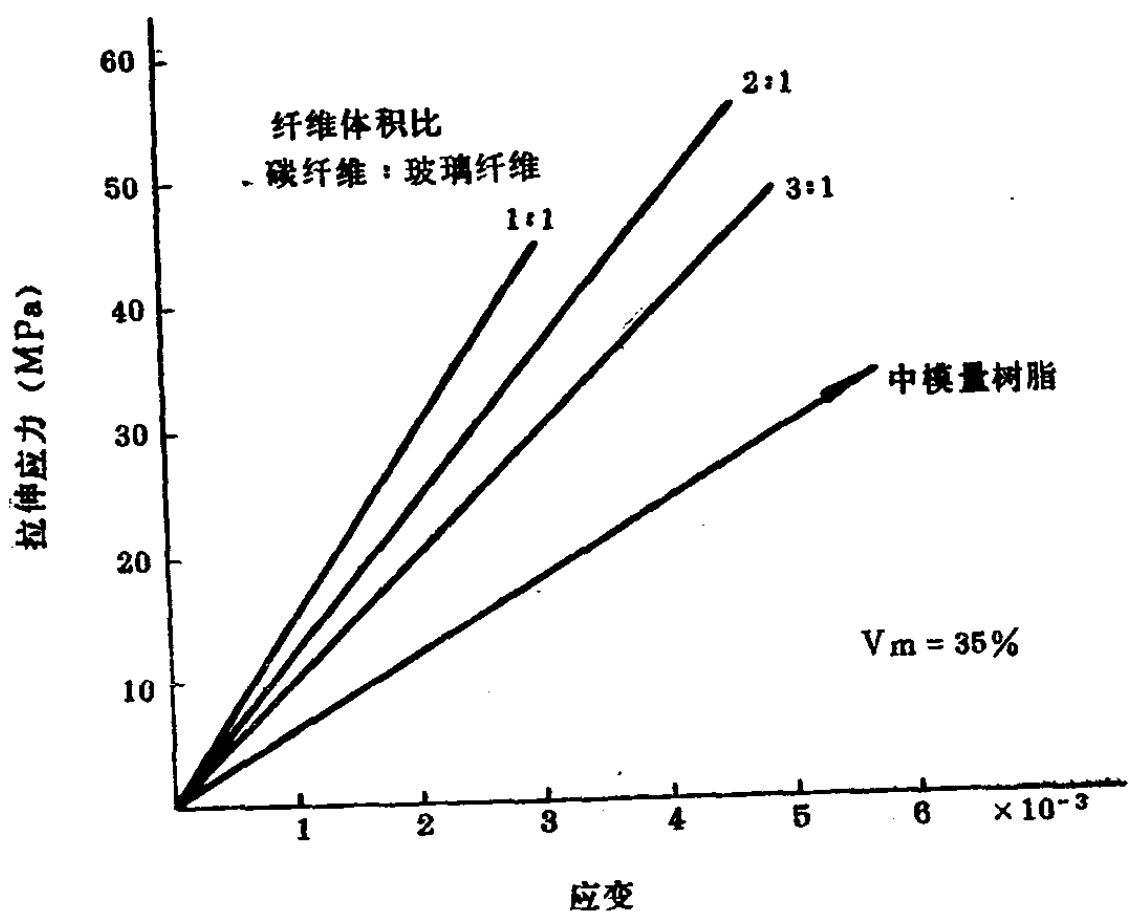


图 2-4 B型单向纤维混杂复合材料横向应力—应变与纤维相对含量关系

2. 拉伸强度

1) 纵向拉伸强度

由于基体采用了中模量环氧树脂，一般有

$$\varepsilon_g > \varepsilon_m > \varepsilon_c \quad (2-2)$$

式中， ε_g 、 ε_m 、 ε_c 分别表示玻璃纤维、基体和碳纤维的断裂应变（即断裂延伸率）。

由式(2-2)可知，单向纤维混杂复合材料 0° 方向的断裂应变由碳纤维所控制，若不考虑断裂延伸率的混杂效应，则混杂纤维复合材料被拉伸到碳纤维的断裂应变时，碳纤维断裂，碳纤维原先承担的载荷转嫁给玻璃纤维承担，在碳纤维断裂的瞬间，玻璃纤维被迅速拉长，载荷并不立即上升而表现为“屈服”现象。因此可以预料，当玻璃纤维拉伸强度高于碳纤维的拉伸强度、且碳纤维含量小于某一定值（临界含量）时，拉伸破坏将为二级破坏。

若略去树脂的承载能力，则单向纤维混杂复合材料 0° 方向一级拉伸强度为

$$\sigma_{HtI} = (1 - V_m) \varepsilon_c (E'_c V_c + E'_g V_g) \quad (2-3)$$

设 $E'_g/E'_c = k$ ，则式(2-3)可以写成

$$\begin{aligned} \sigma_{HtI} &= (1 - V_m) \varepsilon_c E'_c (V_c + k V_g) \\ &= (1 - V_m) \sigma'_{tc} [(1 - k) V_c + k] = K V_c + H \end{aligned} \quad (2-4)$$

其中， $K = (1 - V_m) \sigma'_{tc} (1 - k)$ ； $H = (1 - V_m) \sigma'_{tc} k$ ； σ'_{tc} 为碳纤维的拉伸强度。

由玻璃纤维断裂应变所控制的二级拉伸强度为

$$\sigma_{HtII} = (1 - V_m) \sigma'_{tg} V_g \quad (2-5)$$

令 $\sigma_{HtI} = \sigma_{HtII}$ ，则有

$$(1 - V_m) \sigma'_{tc} (1 - k) V_c + (1 - V_m) \sigma'_{tc} k = (1 - V_m) \sigma'_{tg} (1 - V_c)$$

化简得