

混杂纤维复合材料

宋焕成 张佐光 编著

北京航空航天大学出版社

混杂纤维复合材料

宋焕成 编著
张佐光

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

混杂纤维复合材料是一种新兴复合材料。它不仅应用在航空航天飞行器中，而在车、船、建筑、医疗器械、坦克枪炮、体育用品等产品中也有广泛应用。本书主要包括混杂纤维复合材料的材料特点、组分、制件工艺、力学性能、混杂效应、设计与应用等。内容丰富，理论与实践兼备；取材新颖，除作者研究成果外，又综合了近年国内外研究新成果。它不仅是本科生、研究生的教材，亦可供科研工作者、工程技术人员使用。

混 杂 纤 维 复 合 材 料

HUNZAXIANWEI FUHECAILIAO

宋焕成 张佐光 编著

责任编辑 许传安

北京航空航天大学出版社

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

850×1168 1/32 印张：20.25 字数 544 千字

1989年6月第一版 1989年6月第一次印刷 印数：1700册

ISBN 7-81012-077-8/TB·015 定价：4.55元

前 言

混杂纤维复合材料是由两种或两种以上增强纤维同时增强一种基体的复合材料。通常所用的增强纤维有碳纤维、凯芙拉纤维、玻璃纤维、碳化硅纤维等。基体有聚合物树脂基体、金属基体、陶瓷基体等。本书介绍聚合物树脂基体混杂纤维复合材料。

混杂纤维复合材料是当前复合材料发展的重要方向之一。这种复合材料，由于两种纤维的协调匹配、取长补短，不仅有较高的模量、强度和韧性，而且可获得合适的热物理性能，从而扩大了结构设计的自由度及材料的适用范围。同时，还可以减轻重量，降低成本，提高经济效益。因此，混杂纤维复合材料得到了迅速的发展，不仅应用于航空、航天工业，而且也开始推广到国民经济各个部门。

本书内容包括：混杂纤维复合材料的特点、增强材料和聚合物树脂基体的结构与性能、复合工艺、混杂纤维复合材料的力学行为、混杂效应及设计与应用。

全书着重介绍了材料、工艺与性能、应用理论知识及国内外发展动向，力图对我国混杂复合材料的发展尽微薄之力。

本书与作者1986年由国防工业出版社出版的《聚合物基复合材料》一书结合，形成树脂基复合材料较完整的内容。但限于作者的水平，对资料的收集、分析和阐述有片面或不妥之处，恳请读者批评指正。

书中引用了很多国内外文献资料，还直接或间接得到一些同志编写的资料，在此谨向文献资料的作者深表感谢。

本书编写过程中，承蒙陈志良同志和邓浩、邢丽英、梁志勇、李宏运、仲伟虹等同志热情支持和协助，在此表示衷心的感谢。

编著者

1988.4.

目 录

第一章 混杂纤维复合材料的特点

- § 1.1 材料科学与复合材料····· (1)
- § 1.2 混杂纤维复合材料的含义与特点····· (3)

第二章 混杂纤维复合材料的组分

- § 2.1 混杂纤维复合材料的树脂基体····· (9)
 - 一、概 述····· (9)
 - 二、复合材料树脂基体····· (16)
- § 2.2 增强材料····· (90)
 - 一、概 述····· (90)
 - 二、碳纤维····· (96)
 - 三、凯芙拉 (Kevlar) 纤维·····(127)
 - 四、玻璃纤维·····(169)
- 参考文献·····(180)

第三章 混杂复合材料及其制件工艺

- § 3.1 概 述·····(184)
- § 3.2 混杂复合材料的混杂方式·····(185)
 - 一、单向混杂纤维复合材料的混杂类型·····(185)
 - 二、单向预浸料角铺层混杂类型·····(187)
 - 三、不同种类纤维混杂织物的混杂类型·····(187)
 - 四、超级混杂复合材料类型·····(188)
 - 五、三向编织物混杂类型·····(189)
 - 六、混杂复合夹层结构类型·····(190)
- § 3.3 复合材料成型固化工艺理论·····(204)

一、工艺性的含义	(204)
二、固化工艺理论	(206)
§ 3.4 复合材料固化过程与工艺参数研究	(235)
一、复合材料工艺参数与性能的关系	(235)
二、研究复合材料固化工艺参数的方法	(245)
§ 3.5 混杂纤维复合材料及其制件成型工艺方法	(263)
一、概述	(263)
二、复合材料制件的低压固化成型方法	(268)
三、复合材料与制件热膨胀模塑法	(274)
四、复合材料制件传递模塑方法	(280)
五、拉挤成型工艺	(282)
§ 3.6 复合材料的质量控制与检测	(293)
一、复合材料的质量与质量控制	(293)
二、复合材料固化工艺过程的监控	(299)
三、复合材料的无损检测	(315)
§ 3.7 复合材料研制过程中的辅助材料	(323)
参考文献	(331)

第四章 混杂纤维复合材料的力学性能

§ 4.1 概述	(335)
一、复合材料按纤维排列方向的五种类型	(335)
二、决定复合材料力学性能的主要因素	(337)
三、复合材料的各向异性的概念	(340)
§ 4.2 单向混杂纤维复合材料的力学行为	(343)
一、单向混杂纤维复合材料的拉伸特性	(343)
二、单向混杂纤维复合材料的弯曲性能	(353)
三、单向混杂纤维复合材料的冲击行为	(368)
四、混杂纤维复合材料的剪切性能	(387)
五、混杂纤维复合材料的疲劳性能	(394)

§ 4.3	混杂纤维复合材料层合板的力学性能	(405)
§ 4.4	夹层结构的混杂复合材料基本力学性能	(414)
	一、芯子材料性能	(416)
	二、夹层结构的基本力学性能	(423)
§ 4.5	环境因素对混杂纤维复合材料性能的影响	(438)
	一、概 述	(438)
	二、混杂复合材料组分的耐环境性	(445)
	三、混杂纤维复合材料的耐环境性能	(449)
	参考文献	(471)

第五章 混杂纤维复合材料的混杂效应

§ 5.1	概 述	(475)
§ 5.2	混杂纤维复合材料的界面	(476)
	一、表面和界面	(478)
	二、界面的形成	(485)
	三、界面层结构与性能	(487)
§ 5.3	混杂纤维复合材料的破坏过程与断口形貌	(502)
	一、单一纤维的单向复合材料的破坏机理	(502)
	二、单一纤维不同角度铺层复合材料的破坏断口	(509)
	三、混杂纤维复合材料的破坏过程	(515)
§ 5.4	混杂纤维复合材料的混杂效应	(530)
	一、引起混杂效应的因素	(533)
	二、混杂效应 (HY-E) 理论分析	(541)
	三、混杂效应系数的应用与估算	(548)
	参考文献	(555)

第六章 混杂纤维复合材料的设计与应用

§ 6.1	混杂纤维复合材料的设计基础	(559)
	一、混杂纤维复合材料的材料设计	(559)

二、混杂复合材料的结构设计.....	(580)
§ 6.2 混杂复合材料的应用	(595)
一、混杂复合材料在航空、航天工业中的应用.....	(596)
二、混杂纤维复合材料在船舶工业中的应用.....	(608)
三、混杂复合材料在建筑设施中的应用.....	(617)
四、混杂复合材料在汽车工业中的应用.....	(623)
五、混杂复合材料在体育制品中的应用.....	(628)
六、混杂复合材料在医疗领域中的应用.....	(634)
七、混杂复合材料在其它领域中的应用.....	(636)
参考文献	(639)

第一章 混杂纤维复合材料的特点

§ 1.1 材料科学与复合材料

科学技术发展的历史与现状说明，人类在科学技术上的进步往往是与新材料的出现和应用分不开的。总结材料发展的历史，特别是近三十年来，对于材料的研究由靠经验和摸索的办法发展到不仅可以通过分子合成、材料的改性及多种材料的复合得到新材料，而且还可以从分子结构设计来研制预定性能的材料，形成较完整的材料科学体系。

单一材料有时不能满足实际使用的某些要求，人们已成功地把两种以上的材料制成复合材料，以克服单一材料的缺点，改进单一材料的性能，并通过各组分的匹配协同作用，还可出现原来单一材料所没有的新性能，达到材料的综合利用，以提高经济效益。

复合材料是一种多相复合体系。在复合体系中可以是异质异相的，也可以是同质异相的。因此，通过不同质的组成、不同相的结构、不同含量及不同方式的复合，可以制造出满足各种用途的复合材料。目前复合材料的复合技术已经能使金属材料、陶瓷材料、玻璃、碳质材料、聚合物材料等之间进行复合，相互改性，使材料的生产和应用得到综合发展。同时，学科间交叉渗透，促进了边缘学科、材料科学的发展，加快了国民经济各个部门的产品、元件、结构的改型换代。因此说，材料科学的发展，将推动着整个经济领域的发展。

当前，高分子材料工业中的大多数塑料、橡胶、纤维、薄膜、涂料、粘合剂等产品是采用共混、间充聚合 (Interstitial

Polymerization)，接枝或嵌段共聚等方法来制备的。这实际上就是把两种或两种以上的不同聚合物制成多相复合体系。这种聚合物的多相复合体系通常称为聚合物复合物。

聚合物复合物，也称大分子复合物 (Macromolecular Composite)，是指一个大分子中，一部分链段形成分散相，而其余部分链段形成连续相。它们是由同一大分子形成的两相。故两相之间的界面有很强的相互作用力(为化学键连结)。这种聚合物复合物可以由不同化学组分的链段组成，也可以是单一化学组分所组成。如，单一化学组分中一部分链段形成结晶区，而另一部分链段形成无定型区，或是一部分链段高度有序化形成纤维似的“增强物”分散在另一部分链段所形成的基体中，形成所谓自增强的聚合物复合材料。由于这种自增强的复合材料是同质异相自增强，因此它的性能将更稳定，就具有更好的耐环境性，并可简化工艺，没有复杂界面问题。对这类工作，目前还仅是集中在一些刚性的棒状伸长链的芳杂环聚合物。当然，在实施高度有序化的转变研究工作上还有很多的问题。但可以预料这种自增强复合材料的开发，将引起复合材料的重大革新。

聚合物复合物还可以由硬链聚合物对软链聚合物起着物理交联和增强作用，也可以由软链聚合物对硬链聚合物起增韧作用。这种聚合物复合物其硬链可以凝聚成分散的物理交联微区。这种交联微区类似化学交联点，可以阻止链段的塑性流动。这种复合物可以通过热塑性塑料加工成型的方法快速生产聚合物复合材料制品。

还有一种聚合物叫聚合物贯穿网络复合物 (Interpenetrating Polymer Networks Composite, 即 IPNC)。它是由聚合物大分子相互穿透形成网络的，并呈拓扑结构的带状复合物。这种强化两相界面区域大分子之间的相互作用，将导致相界面有更好的结合力，并能得到更均匀、稳定的多相复合物。INPC 根据制备方法的不同，可得到三种类型的贯穿网络结构复合，即

两种聚合物单体混合后，有顺序地形成A网络和B网络相互贯穿的聚合物网络。这种方法称为 Sequential 法。两种预聚物混合后同时发生各自的交联形成相互贯穿的聚合物网络，称为 Simultaneous 法。两种聚合物与交联剂同时混合进行凝胶与固化形成相互贯穿的聚合物网络，称为 Latex 法。

上述的复合物的制备方法所得到的复合物具有独特的结构。因此其性能比相应的两种聚合物共混的方法具有更优良、更可设计的联合性能。

上述介绍的复合物的复合材料，以及当前发展迅速、应用广泛的各种增强剂增强各种基体的复合材料，其中尤以连续纤维增强的复合材料、两种连续纤维混杂增强的混杂复合材料，在科学技术与国民经济各个领域发挥着愈来愈重要的作用。

§ 1.2 混杂纤维复合材料含义与特点

混杂复合材料从广义上讲，包括的类型非常广。就基体而言，可以是树脂基体，也可以是各种树脂聚合物混合基体、金属基体以及各种陶瓷、玻璃等非金属基体。

从增强剂来说，可以是两种连续纤维单向增强，也可以是两种纤维混杂编织、两种短纤维混杂增强、两种粒子混杂增强以及纤维与粒子混杂增强等。当前，增强剂的混杂，主要还是指连续纤维的单向混杂增强与混杂编织物增强。

本书所介绍的混杂纤维复合材料是指由二种或两种以上的连续增强纤维增强同一树脂基体的复合材料。它是复合材料领域中的一个重要组成部分，混杂纤维复合材料与单一纤维复合材料不同的是多一种增强纤维。因此，它除了具有一般复合材料特点外，还具有一些新的性能，可以较为广泛地满足使用要求。

长期以来人们希望的理想结构材料，是要求它们受载后开始有高的模量，随之达到较高的屈服极限，然后在承载能力稍有降

低的情况下持续到一定应变量后破坏，如图 1-1 所示。这样的理想结构材料，可以通过不同断裂应变的纤维混杂，制成混杂纤维复合材料实现。如用低延伸率的碳纤维与高延伸率的玻璃纤维混杂制成的混杂复合材料，开始承载时性能服从混合法则，当连续承载应变达到相当于低延伸率纤维的破坏应变时，脆性纤维发生断裂。然后载荷全部由高延伸率纤维承担，载荷应变曲线出现如同没有脆性纤维场合一样的应力-应变曲线，直到材料的应变达到高延伸率纤维的破坏应变，材料整体发生破坏，如图 1-2。从图 1-2 可知混杂纤维复合材料的力学行为满足了人们所希望的理想材料的应力-应变行为。

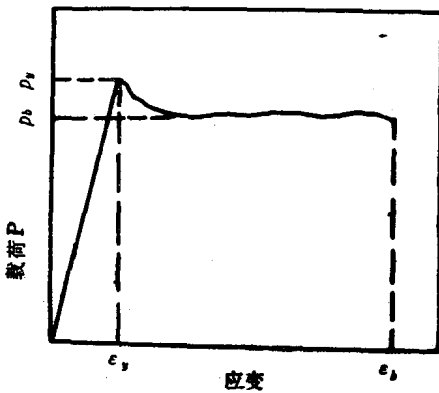


图 1-1 理想结构材料的载荷-应变行为

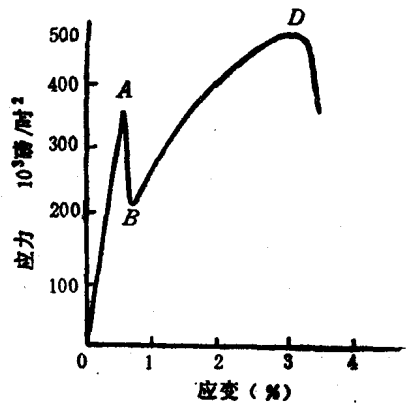


图 1-2 混杂纤维(碳纤维/玻璃纤维)复合材料的应力-应变行为

归纳混杂纤维复合材料的特点有以下几个方面：

1. 结构设计与材料设计的统一性

混杂纤维复合材料与单一纤维复合材料比较更突出了材料与结构的统一性，就是说结构设计的本身包含着材料的设计。混杂纤维复合材料可以根据结构的使用性能要求，通过不同类型纤维

维、不同纤维的相对含量、不同的混杂方式进行设计。

充分认识与研究材料科学的规律，不仅可以解决结构设计 with 材料设计的统一性，还将能进一步揭示材料科学的理论，促进与完善复合材料功能化的发展趋势。这就是兼备力学性能与透电磁波性能、力学性能与水下透声纳性能、力学性能与隐身性能等。航空航天飞行器、先进的远程导弹往往需要材料与结构同时具有承力、抗烧蚀、抗粒子云、抗激光、抗核能、吸波、隔热等性能。对材料与结构的这种要求一般单一材料是不可能满足的，这就迫使人们必须对混杂纤维复合材料、超级混杂复合材料及其结构进行规律性的研究与开发。

2. 扩大构件设计自由度与工艺实现的可能性

单一纤维增强复合材料的构件设计自由度较一般工程材料的自由度要大，而混杂复合材料构件的设计自由度可进一步扩大。由于混杂复合材料构件工艺实现的可能性超过单一纤维复合材料，相应又进一步扩大了构件的设计自由度。如高速飞机的机翼，由玻璃纤维复合材料制造，则刚度除翼尖外都能满足。为解决翼尖的刚度不足，可以求助于混杂纤维复合材料，即在翼尖处增加或换成部分碳纤维，则可增加刚度，较容易地达到设计要求。这种混杂复合材料结构的设计，在工艺上是不难实现的。又如，直升机的旋翼虽可以用玻璃纤维复合材料设计与制造，但由于结构与刚度的因素，发现要达到“C”型梁的可能刚度时，又会增加重量和出现共振现象，若改变梁结构可减轻重量，但刚度又不能满足。为此可在后缘位置采用碳纤维、玻璃纤维混杂复合材料，工艺既可实现，结构性能上又满足了使用要求。

3. 提高与改善复合材料的某些性能

通过两种或多种纤维、两种或多种树脂基体混杂复合，依据组分的不同、含量的不同，复合结构类型的不同可得到不同的混杂复合材料，以提高或改善复合材料的某些性能。

众所周知，碳纤维复合材料冲击强度低，在冲击载荷下呈明

显的脆性破坏模式。如在该复合材料中用 15% 玻璃纤维与碳纤维混杂，则其冲击韧性可以得到改善，冲击强度可以提高 2 ~ 3 倍。

玻璃纤维复合材料疲劳寿命为非线性递减，如引入 50% 的碳纤维，其疲劳寿命将转变为线性递减，其循环应力也有较大提高。引入碳纤维的量为 2/3 时，其寿命接近单一碳纤维复合材料。

玻璃纤维复合材料的模量一般比较低，在一些主承力构件上的应用受到限制，但如引入 50% 的碳纤维作为表层，复合成夹芯形式，其模量可达到碳纤维复合材料的 90%。这对于制造不易失稳破坏的大型薄壳制件很有意义。

碳纤维、凯芙拉 (KEVLAR) 纤维等沿纤维轴向具有负的热膨胀系数。如与具有正的热膨胀系数纤维混杂可以得到预定热膨胀系数的材料，甚至为零膨胀系数的材料。这种材料对一些飞机、卫星、高精密设备的构件非常重要。如探测卫星上的摄像机支架系统就是由零膨胀系数的混杂纤维复合材料制造的。它可使焦距不受太空温度剧烈交变的影响，保证精度。

碳纤维复合材料具有较低的破坏应变。为了提高这种破坏应变，可引入玻璃纤维。由于混杂效应的原因，碳纤维复合材料破坏应变可提高 40%。

异种材料复合的复合材料，振动衰减性要比原来均质材料大。同样，两种纤维混杂的复合材料其衰减振动性增加更大。一种高精度的铣床若用混杂复合材料的话，除减重外，还可以吸收高频振动。

玻璃纤维复合材料虽属电绝缘材料，但它有产生静电而带电的性质，因此不适宜用来制造电子设备的外壳。碳纤维是导电、非磁性材料。用两种纤维混杂可有除电及防止带电的作用。另外玻璃纤维复合材料有电波的透过性；碳纤维有导电性可以反射电波。两者混杂可用于电视天线，以解决电子设备的电波障碍及无

线电工作室的屏蔽。

4. 混杂复合材料可降低制品成本

美国 1971 年碳纤维的价格为 22 美元/公斤，1977 年则降到 7 美元/公斤。有些品种如 Hercules 生产的 Magnamiee As-3 已降到 40 美元/公斤。据国外报导，由于沥青直接转变成液晶的技术突破，可能有效的降低成本，有希望降到 11 美元/公斤。凯芙拉纤维早期售价为 111 美元/公斤，近期已下降为 13~22 美元/公斤。美国生产的 S-2 高强度、高模量玻璃纤维价格为 5.5 美元/公斤。这种纤维的价格比一般玻璃纤维高很多，但比高级纤维又低很多。

我国生产的碳纤维早期为 1000 元/公斤、当前为 600 元/公斤，预计近期可降为 400 元/公斤。国产的高强玻璃纤维，S-玻璃纤维价格为 30 元/公斤，比一般玻璃纤维价高许多。

从上述的价格情况看出，目前国产碳纤维的价格比玻璃纤维的价格约高 20~30 倍，国外的价格约高 10~20 倍。因此，在性能允许的情况下，用价格低的纤维取代部分高价纤维是降低制品成本的有效途径。当然，这仅是直观的从原材料成本考虑。另外更重要的是选用混杂复合材料可以改进制品的结构、性能、工艺以及降低能耗、节约工时等，可获取更大的经济效益。

如直升机的金属旋翼桨叶改用混杂纤维复合材料，可以取消桨毂的水平铰和垂直铰，使旋翼和桨毂成为刚性连接，从而使桨毂结构大大简化，零件数量可由原来 400 种减少到 100 余种。结构改变后，重量减轻 40%，简化了生产工艺，减少生产设备，缩短制造周期，大大降低成本。另外复合材料桨叶与金属桨叶结构比，可以有效地提高寿命，一般由金属的几百小时、几千小时，提高到上万小时。

英国快艇的船壳是由玻璃纤维复合材料制造的。为补其刚度不足，在玻璃纤维复合材料的两边以凯芙拉纤维取代部分玻璃纤维，制造成夹芯结构船壳。其结果提高了刚度，减轻了重量，航

行速度可提高 20%，燃料费节约 33%。同时，由于使用部分凯美拉纤维而提高的造价两年之内可以收回。

由于混杂纤维复合材料具有上述的特点和效益，已较为广泛地得到重视，并可预计它会越来越发挥作用。

第二章 混杂纤维复合材料的组分

§ 2.1 混杂纤维复合材料的树脂基体

一、概 述

复合材料树脂基体一般是指合成树脂与各种助剂组成的基体体系。混杂纤维复合材料树脂基体一般说来，与复合材料的基体组成要求是一样的。当前已有的一些商品树脂体系均可作为混杂纤维复合材料树脂基体使用。但从混杂纤维复合材料的特性分析，无论在理论上，还是在实际使用中研究适应混杂纤维复合材料的树脂体系还是有意义的。

树脂基体是复合材料主要组分之一。笼统地说，复合材料的力学性能主要来自增强纤维，是不全面的。应当说，纤维通过树脂基体形成一个整体，树脂起着传递载荷和均衡载荷的作用。只有纤维与树脂两者匹配协调，才能充分发挥整体作用以及各自的性能。

然而复合材料的工艺性能、力学性能的压缩强度和层间剪切强度以及其它方面的物理或化学性能都主要取决于树脂基体。因此多年来在复合材料的研究与发展中，树脂基体研究与开发占据着重要位置。

当复合材料应用于飞行器主承力件时，则要求它具有比现在高得多的断裂伸长，如美国对下一代客机波音 777 上所采用的碳纤维复合材料中的碳纤维要求是：强度 4900MPa、模量 2.84×10^5 MPa、伸长 2% 以上。这就是需要有与之相适应的基体。

J. C. Seferis^[1] 认为复合材料用于一类结构件，断裂伸长