

复合材料浅说

文和阳 王云惠

中国建筑工业出版社

复合材料浅说

文和阳 王云惠

中国建筑工业出版社

前 言

现代复合材料的发展引起了广泛的重视，它已经涉及到塑料、橡胶、金属、陶瓷等各个领域，在材料科学中占有相当重要的地位。对科技工作者来说，复合材料应该作为常识有所了解，其他同志知道一些复合材料的基本知识也是有益的。

本书就是本着这样目的编写的，希望通过本书使读者对复合材料的概貌有所了解。

复合材料种类繁多，涉及学科很广，同时对什么是复合材料，国内外学者亦有不同的看法，一般可归纳为两类，广义的指由两个或多个物理相组成的固体材料。例如玻璃纤维增强塑料、钢筋混凝土、橡胶制品、石棉水泥板、三合板等。狭义的指高性能玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、陶瓷纤维、晶须、芳香族聚酰胺纤维等增强的塑料、金属、陶瓷等材料。当然也有介于两者之间提法的。为使读者对复合材料有全面了解，本书根据广义的提法取材和编写，鉴于复合材料发展现状和作者的专业限制，本书以塑料基复合材料为主，全面论述各类复合材料。但对混凝土、木材等常用材料没有作进一步的阐述。这种取材和编写的方法，难免有一定的局限性。

本书主要是参考了牧廣等编的《複合材料技術集成》和林毅编的《複合材料工学》两本书并搜集了一些国内外资料编写的。限于作者水平，谬误之处在所难免，望读者批评指正。

目 录

第一章 复合材料概况	1
一、概述	1
二、复合材料的定义和分类	8
三、有关复合理论问题的几种观点	13
第二章 塑料基复合材料	19
一、概述	19
二、增强材料	23
三、树脂基体	33
四、增强塑料的成型方法	43
五、玻璃纤维增强塑料的一般性能及简单设计原则	49
六、玻璃纤维增强热塑性塑料	63
第三章 其他复合材料	70
一、橡胶基复合材料	70
二、金属基复合材料	81
三、陶瓷基复合材料	95
四、碳素复合材料	101
第四章 复合材料的界面与增强材料的表面处理	110
一、影响界面结合强度的因素	110
二、界面强度对复合材料力学性能的影响	114
三、固体材料的表面状态及表面处理	115
四、偶联剂及偶联剂作用机理	119
五、偶联剂的种类及应用	125
第五章 复合材料的应用	132

一、在宇航和航空方面的应用	132
二、在造船方面的应用	140
三、在车辆制造方面的应用	145
四、在建筑上的应用	152
五、在电工方面的应用	162
六、在化学工业方面的应用	171
七、其他方面的应用	177
第六章 复合材料的发展前景	184
一、基本理论的不断完善	184
二、向材料科学的禁区攀登	188
三、提高工艺水平, 适应各种需要	190
四、降低成本、扩大应用	193
五、对我国今后塑料复合材料发展的几点意见	194

第一章 复合材料概况

一、概 述

在科技书刊、学术活动和日常生活中，我们经常看到或听到“复合材料”这个名词。复合材料到底是什么呢？现在有哪些复合材料？用在什么地方？要把这些问题回答得很好，可真不容易。本书就是想粗浅地向读者介绍这些知识。

如果说，复合材料已经与人们的生活及科学文化活动密切相关，也许有人会感到惊讶，其实这并不是夸大其辞，先让我们举几个大家熟悉的例子。

人们总得住房子，而造楼房所用的钢筋混凝土就是由水泥、砂、石、钢筋等材料制成的复合材料。

人们不能不穿衣服，而通过合成纤维或人造纤维与天然纤维混纺制成的各种衣料，穿起来挺括、滑爽，洗涤容易，着色良好，并且结实耐用，也是复合材料。

你每天早晨起来要穿上鞋子，然后坐车去上班。你穿的鞋很可能就是由合成革或人造革等复合材料制成的，看起来与天然皮革几乎没什么区别。当你乘汽车的时候，你也许没有想到汽车的轮胎也是复合材料——纤维增强橡胶制成的。没有轮胎，也就没有现代汽车工业的发展。

看来，人们的衣食住行都离不开复合材料，而科学文化活动就更离不开它。

我们学习用的桌、椅，由于木材缺乏，很多采用木屑板和

塑料贴面制成的装饰板制作，这种装饰板就是一种复合材料。

中国乒乓健儿在第三十六届世界乒乓球锦标赛中，夺得了全部七个冠军。运动员们用的红双喜乒乓球拍就是由橡胶和木材复合而成的。

我们还记得我国第一颗人造卫星发射成功时那激动人心的情景吧！而发射这人造卫星所用的运载火箭很多部件都是由复合材料构成。美国“北极星”A₃导弹的第一、二级火箭发动机壳体用纤维增强塑料代替金属以后，重量减轻了45%，射程由1600公里增加到4000公里。火车、轮船、飞机上所用的复合材料也是举不胜举。

自然界的复合材料就更屡见不鲜了。竹子、木材、动物的骨骼和海带等都是复合材料。通过电子显微镜观察发现，竹子的断面与碳纤维增强金属很相似，它实际上是天然纤维素与天然树脂组成的复合材料。海带的结构也同碳纤维增强环氧树脂类似。

实际上，复合材料早已介入人们的生活。

我国在汉代就已经有了用大漆、木粉、泥土、麻布等复合塑造寺庙佛像的技术，当时这种佛像叫脱胎漆塑像。这种塑像虽然体积庞大，但重量轻，质地坚固，经久不坏，便于车载游行市街，供百姓观赏、礼拜，因此也称“行像”。在魏晋南北朝时期，佛教盛行，“行像”的制作也就风靡一时，当时晋国的匠师戴逵便以塑造这种精妙无比的“行像”而闻名全国。约在唐初，我国的这种技术传入日本，在日本称为活脱干漆。日本天平时代雕塑艺术的精品——奈良市东大寺法华堂的贴金“不空绢索观音像”和“梵天像”等就是这种活脱干漆像。回国探亲的鉴真大师夹纻漆像，形象逼真，

保存到现在仍完美无缺。这种塑像技术与现代增强塑料的手糊成型几乎没有区别。

中国古代的弓也是一种复合材料，它是用动物的皮和筋、腱组合制成的，重量轻，拉力大，射程远，比起笨重的木制弓来优越得多，同现代增强塑料弓极相似。

在金属基复合材料方面，我国早在战国时代就有了相当高的技术和制品。现在出土的越王剑，在潮湿的环境中埋藏了几千年仍然寒光夺目、锋利无比。它就是用复合浇铸技术得到的金属基复合材料制品——包层金属。不仅光亮、锋利而且韧性出众，耐腐蚀性极好。

日本历史上也有类似产品，日本刀曾闻名于世，只不过比中国晚些罢了。

陕西西安半坡村的仰韶文化住房的遗址说明，我国劳动人民早在公元前21世纪，就开始用草混在泥土中铺敷住房的壁体和屋顶。室内地面亦用草泥土铺平压实。这种草泥土就是最原始的纤维增强复合材料，它和现代高性能的纤维增强复合材料非常相似。

在公元前，埃及的金字塔上就使用了石灰、火山灰等作的粘结剂，并与砂、石混合作为混凝土材料。这也就是最原始的粒子分散复合材料。直到1824年发明了波特兰水泥，才相继出现了各种现代混凝土制品。

古代埃及文明时代，关于木材复合材料也已有所应用。从当时的王公贵族的坟墓中出土的家具、棺槨中可见一斑。这些家具、棺槨有些是用贵重的紫檀木贴在普通木材上进行表面装饰的，显得异常美观、华丽。这种技术到两千年前的罗马时代，逐渐发展起来，并被广泛应用了。直到工业革命以后，欧美各国发明了薄片加工机械和各种锯才演变到胶合

板和装饰板的工业生产。

上面这些并不完全的历史资料告诉我们，复合材料是劳动人民在生产实践中不断发展起来的，历史上许多精美的复合材料制品都显示了古代劳动人民的勤劳和智慧。

但是现代复合材料的发展却是近几十年的事，由于原子能、航空、宇航、电子工业、通讯技术以及机械和化工等工业的日益发展，对材料除了要求具有高强度、高模量、耐高温、低密度以外，还对材料的韧性、耐磨、耐腐蚀、电性能提出了种种特殊要求，这就不是单一材料所能达到的了。更特殊的是有些制品要求材料具有一些互相矛盾的性能，如：导电而绝热，强度比钢好、弹性比橡胶好且可以焊接等，这对于单一材料来说就无能为力了。因此要想实现这些性能要求，就必须采用复合技术，把一些不同性能的材料复合起来，以取长补短。于是就出现了现代复合材料，学术界也开始使用“复合材料”这个名词。

在火箭、卫星、飞机上所用的复合材料要比古代的复合材料复杂得多，性能也好得多，它们所用的增强材料不是草、麻刀而是各种高性能的玻璃纤维、碳纤维、硼纤维等，所用的基体也不是泥土、石灰而是塑料、橡胶、金属或陶瓷。在这些复合材料中，纤维和基体粘结在一起，纤维强度大，把主要载荷担在自己身上，使得做为基体的塑料、陶瓷等因为有纤维撑腰也就不容易破坏了。在不饱和聚酯树脂中加入50%的玻璃纤维而制成的复合材料，其强度要比不饱和聚酯树脂本身增加10倍。将连续玻璃纤维浸渍环氧树脂后，用缠绕法可很容易地制取强度比树脂高20倍的复合材料，其拉伸强度比铝高，几乎与钢相同，而比重只有钢的四分之一，真不愧是轻质高强的材料。人们把这种纤维和塑料组成

的复合材料叫纤维增强塑料。如果增强材料是玻璃纤维，就叫玻璃纤维增强塑料，俗称玻璃钢。

作为复合材料的典型——纤维增强塑料的优点除上面提到的轻质高强以外，其耐热性、韧性、耐腐蚀性、耐疲劳性能、耐蠕变性能、硬度、耐磨性等都比塑料有明显提高。而成型工艺简单灵活，还能成型大型或特大型制品，这也是塑料望尘莫及的。更为突出的是通过纤维种类和方向的设计，可以使增强材料更有效地发挥作用，把潜在的性能集中到必要的方向上。同时通过控制纤维含量和方向还可在一定范围内得到所需要的导热系数和热膨胀系数。通过调整复合组分和结构，可制得兼具刚性和韧性，弹性和塑性等矛盾性能的复合材料，为其应用开拓了广阔前景。还可根据要求把上述某些性能组合起来获得多功能的制品。

上面的优点概括起来有两方面的内容，一方面强调了复合效果，说明了复合材料在成型和性能上的独到之处，另一方面则说明了复合材料的可设计性，强调了设计人员可根据使用要求来设计一种复合材料，或改变已经应用的某种复合材料的组分和比例乃至结构，使得满足在某些特殊情况下的新的使用要求。显然由于复合材料的发展，给产品和结构设计提供了更大的设计自由度，可在设计结构的同时，设计材料，在不同的区域和不同的方向上选择不同的纤维和基体、纤维的体积含量和迭层取向，从而达到最有效地利用材料。通过纤维增强材料的设计，可以使纤维方向与主应力方向一致，以便最大地发挥材料作用，减少材料用量，减轻制品重量。这对于那些在强度和重量上都有严格要求的制品尤为重要。例如，用缠绕法生产的容器或火箭发动机壳体。

正因为复合材料有上述优点，所以在结构材料领域发展

极为迅速，近年来结构复合材料正在探索强度高、硬度大、耐高温和用途广的材料，这就要求使用的增强材料具有更高的性能。在无碱玻璃纤维的基础上，发展起来的高强玻璃纤维、不锈钢纤维、硼纤维、碳纤维，聚芳酰胺纤维和各种晶须都在不同的领域显示了自己的独特性能，尤其是碳纤维的出现和发展，在复合材料的生产上，产生了巨大的作用。碳纤维比重小、模量高，价格降低的潜力很大，预计碳纤维将成为结构复合材料中主要的增强材料。

用高强玻璃纤维、硼纤维、碳纤维、聚芳酰胺纤维已经制成了多种结构复合材料制品，它们分别具有强度高、韧性好、刚性强等性能，在高压容器、飞机、宇航、汽车等部门得到了应用。但还须使它们的价格大幅度地降低。

最近研制成功的石墨、碳化硅、氧化铝纤维与铝合金组成的金属基复合材料性能好、耐高温，但比重大、难加工。然而现在已制成加工容易又耐高温的硅-碳化硅复合材料，据称它可以工作在 1370°C 以上的高温 and 腐蚀性的环境中。

热塑性增强塑料是一种发展极快的复合材料。它的优点是形状稳定性好、耐热、强度高、容易加工成型，而且成本低廉。目前已经广泛地用于汽车和设备配件。

在钝态复合材料方面也取得了重大进展。将惰性材料用气相或等离子喷涂的方法涂到高温金属表面，对进一步提高合金的耐高温腐蚀性能极为有效。

包层金属，即将多种金属薄片嵌在金属带上，例如将金、银、铜、锡等合金薄片嵌在钢带上，不仅提高了钢带的电接触性能和机械强度，同时为节约贵金属和稀有金属做出了贡献。

在硅基结构上均匀地掺杂磷，并采用新的离子注入技术

和X光刻蚀技术制得超大型集成电路及各种半导体器件，把大型的复杂的电子设备压缩得更小，例如在1平方厘米的面积上有244行，每行248个元件，元件总数达62000个的集成电路已经问世，并得到了应用。

多功能系统和材料是人们很早就幻想的东西。电子计算机的功能很多，但是它并不是我们所说的多功能系统。我们所说的多功能系统是指在同一时间能进行或完成各种功能工作的系统，严格地说，电子计算机尽管能作各种计算和程序控制，但都不是在同一时间内进行的，所以它不是多功能设备。对材料的多功能性是指在同一时间能发挥不同的功能。这对许多单一材料是不可能实现的，只有复合材料才能实现。例如：把铜片压在两层塑料片之间，就制成了最简单的多功能复合材料。如图1-1所示，沿着铜片的方向可以导电，而垂直铜片的方向却是电的绝缘体，并且有隔热功能。这对单一材料来说是不可能实现的，但对于正交各向异性复合材料来说就很容易实现。

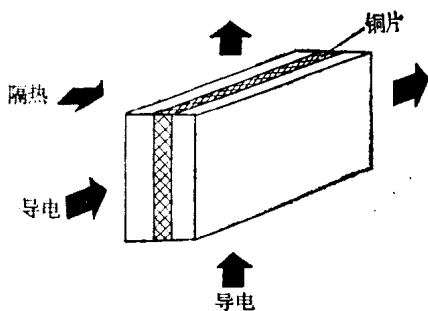


图 1-1 多功能复合材料

可以说，复合材料是材料革命的方向，许多科学家预言：二十一世纪将是复合材料时代。

尽管复合材料的研究工作如此活跃，发展前途如此广阔，发表的文献也相当多，但到目前为止，有关复合材料的理论除个别领域以外都还处于萌芽状态，有待今后进一步完善。

二、复合材料的定义和分类

(一) 复合材料的定义

复合材料从古至今虽有几千年的历史，但现代复合材料的发展则是近几十年的事，目前仍在不断发展。关于复合材料的理论尚不成熟，因此想用几句话对复合材料下个确切的定义，还缺乏必要的理论根据。所以，各国对复合材料的定义及解释有一定差距，而且人们最初使用这个名词时，也不一定这么严格地推敲它的含意。而当许多科学家开始注意这个问题时，就分别从不同的角度去理解和解释复合材料，有些虽然从字面上看好象都差不多，但对待复合材料的具体分类和鉴别却各不相同。

国际标准化组织曾在塑料名词术语定义中把复合材料定义为“由两种以上在物理和化学上不同的物质组合起来而得到的一种多相固体材料。”详细地说，也就是用适当的工艺方法，把两种或两种以上在物理和化学上不同的物质复合起来，形成多相体系的固体，其性能比组成它的材料性能要好，也就是说要有复合效果。多相体系和复合效果也就是复合材料区别于化合物材料和混合材料的两个特点。但是，这种说法也不能认为是很确切很完善的。所以，可以说目前对复合材料还没有一个确切、完整的定义。从各国的具体情况来说，一般对复合材料的含义有两种，广义的指由两个或多个物理相组成的固体材料。例如玻璃纤维增强塑料、钢筋混凝土、橡胶制品、石棉水泥板、三合板等，甚至包括泡沫塑料或多孔陶瓷等以气体为一相的材料。狭义的指用高性能玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、陶瓷纤维、晶须、芳香族聚酰胺纤

纤维等增强的塑料、金属和陶瓷材料。亦有定义范围介于两者之间的。本书为了全面叙述复合材料，还是采用了广义的提法，但对于混凝土、木材等常用的复合材料没有作进一步的讨论。

不管怎么说，复合材料的种类和范围都是很广泛的，它涉及到由尖端技术领域到和人们密切相关的日常生活的各个方面，所以站在不同的角度对定义有不同的理解是难免的，但是如何给复合材料下一个科学的、严谨的定义，也是势在必行。当然这还有待作进一步的研究和努力。

在这里还必须说明的是，复合材料既然是材料，就应该是指制造成品的原料。而实际上，人们把复合结构、复合制品都叫做复合材料，这当然与复合材料这个词不相符。但既然已经为人们所习用，也只好沿用下去。

（二）复合材料的分类

由于复合材料的定义尚不确切，所以分类也无法统一，在此只能综合介绍一下各学派对复合材料分类的几个基本想法。

1. 由构成的原材料进行分类

复合材料种类繁多，按其构成的原材料在复合材料中的形态，可以分成基体和分散材料。基体是一种连续相的材料，它把纤维或粒子等分散材料固结成一体。不同的基体和分散材料可以构成不同的复合材料。最典型的分类如表 1-1 所示。

这种分类方法只是适应复合材料的现状的一种比较实际的分类方法。但是这种方法也有缺点，例如对于象包层金属、胶合板等复合材料就不能分出哪个是基体，哪个是分散材料。复合材料中类似这样的东西还有很多，就不好办了。

由原材料对复合材料进行的分类

表 1-1

基 体 分散材料	金属材料	非金属材料			有机材料			
		陶瓷	瓷	水泥	木材	塑料	橡胶	其他
金属材料	FRM、包层金属,	FRM、包层金属、陶瓷、金属陶瓷	钢筋混凝土			FRP、夹网玻璃、金属陶瓷	轮胎、缓冲材料 (橡胶弹簧)	
	FRM、弥散强化金属	FRM、弥散强化金属、陶瓷、磨具	GRC			FRP、砂轮、FRP	轮胎多层玻璃	玻璃纤维增强碳
	碳纤维增强金属		石棉水泥板		石棉胶合板	树脂混凝土	乳胶水泥	
非金属材料	陶瓷					树脂石膏摩擦材料、CFRP	碳黑补强橡胶	碳-碳复合材料, 不透性石墨
	水泥							
	其他							
有机材料	木材		石棉胶合板、水泥刨花板			装饰板、WPC、胶合板FRP		
	塑料	铝、聚乙烯复合薄膜			装饰板、WPC	复合薄膜, 合成皮革		
	橡胶							
其他						泡沫塑料, 人造革	橡胶布	漆布

注: 表中代号: FRM——纤维增强金属; FRP——纤维增强塑料; GRC——玻璃纤维增强水泥;
FRM——弥散强化金属; FRP——填充塑料; WPC——木材-塑料复合材料;
FRM——弥散强化金属; FRP——纤维增强塑料; GRC——玻璃纤维增强水泥。

根据上面的分类法，对不同的复合材料有三种叫法：

以基体为主的叫法：如塑料基复合材料、金属基复合材料等。

以分散材料为主的叫法：如玻璃纤维增强复合材料、碳纤维增强复合材料等。

基体和分散材料并用的叫法：例如不饱和聚酯树脂-玻璃纤维层压板、木材-塑料复合材料等。

2. 按复合性质进行分类

按复合性质进行分类，大体上有两种：

(1) 合体复合（物理复合）材料

如图 1-2 所示，在复合的前后，构成的原材料的性质、形态、含量大体上没有变化，例如玻璃纤维增强塑料等。



图 1-2 合体复合



图 1-3 生成复合

(2) 生成复合（化学复合）材料

如图 1-3 所示，在复合的前后，构成原材料的性质、形态、含量发生显著的变化，其特点是在复合过程中形成多相结构。例如动物、植物组织的天然材料属于生成复合材料。已经应用的人造生成复合材料目前还很少，单向结晶的硬质合金，是为数甚少的几种工业化生产的生成复合材料之一。

3. 按复合效果进行分类

按复合效果可分为力学复合和功能复合。

(1) 力学复合材料

由于复合，力学性能显著提高的复合材料。如在结构材

料中使用的纤维增强塑料。

(2) 功能复合材料

先进的复合材料具有轻质高强的特点，这本身就是轻与强的功能复合，这一点利用最广泛，并进行了专门研究，所以不再列为功能复合材料之列。现在功能复合的意思包括力学性能以外所有其他性能的复合。这种复合效果是在人们利用力学复合的基础上逐步认识的，并且预言了将来复合材料在功能复合上的效果和应用，将不亚于力学复合。

材料的各种性能有的互相依赖，有的互相独立。材料复合以后，可以把两种材料的突出优点统一在一个产品上，使它们同时发挥作用，而成为多功能复合材料。多功能复合材料是复合材料今后发展的重要方向。

4. 坐标分类法

有的科学家，用直角坐标的三个坐标轴分别表示基体的分类、增强材料的状态、以及复合的方式，如图 1-4 所示。

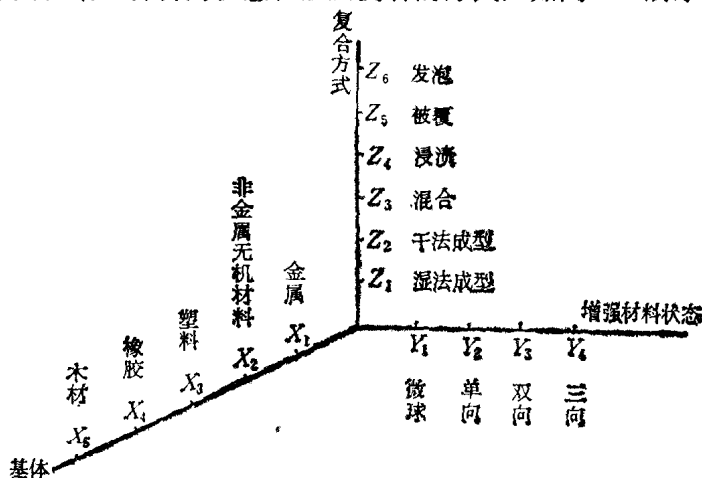


图 1-4 合体复合材料的三要素