

序 言

本书所收集的文章是专题报告会的一部分，该报告会是由意大利 Ispra 研究院联合研究中心的训练、教育业务部和材料科学部协同 Naples (位于 Asmeccanica) 的复合材料研究中心共同组织的，是联合研究中心 Ispra 教学计划的一个组成部分。制订 Ispra 教学计划时，一方面要求注意到把该研究中心所获得的知识作为研究成果有效地介绍给外界，同时也注意到联合研究中心在欧洲一级水平上促进科学交流所应起的作用。正是在这个基点上，我想要反复说明本文集的性质和目的。

最近几十年来，政府和工业界都花费了大量的资金用于研制高级复合材料。因而，这种材料的工艺取得了显著的进展。但是，复合材料的巨大潜力还没有充分发挥出来，一方面可能是由于它们的价格昂贵，另一方面则可能是缺乏就材料的现有情况和应用范围对更多的用户进行有效的宣传。本文集就是试图改善这种状况，其目的是通过介绍复合材料的发展现状，以便尽可能地沟通从事发展工作的研究人员与打算利用这种材料的工业界人士之间有益的联系。

本文集讨论高级复合材料的以下一些内容：力学和物理性能，结构和物理应用中的设计，制造工艺和评价，性能测试，以及这些高级复合材料在结构、运输、通讯等方面的应用。此外，还包括了聚合物、金属这两类基体和各种类型的长丝、纤维与晶须。

作为 Ispra 复合材料进展报告会的学科协作者，在这里

借此机会对在 Ispra 与我们紧密协作的所有报告者和为准备本书而付出心血的合作者表示谢意，并感谢报告会的全体成员，他们的积极参与是本书获得成功的基本因素。还应特别强调的是，没有大家帮助与组织，这些成就是不可能取得的。我非常感谢物理学和自然科学部理事 G. R. Bishop 教授，材料科学部负责人 P. Schiller 博士对我们的鼓励。我同样要感谢训练、教育业务部负责人 B. Henry 先生，是他在 S. Porrini 先生的协助下支持了这本文集的组织工作，并处理了全部行政事务。对材料学部的 R. Matera 博士和 G. Pellegrini 博士的协作，亦在此表示感谢。

在这里还应对复合材料中心的领导人 Crivelli-Visconti 教授有益的建议和真诚的协作表示感谢。

G. Piatti

引 言

G. R. Bishop

意大利 Ispra 研究院联合研究中心
物理学和自然科学部理事

当前科学发展的特点是随着各学科自己的特性、技术和应用的发展进一步分成次级学科,从而产生出某些变迁,甚至经常更改了它们的原有名称。这样就涌现出一些新学科,其中一门就是材料科学,它是从整体上而不是孤立地从化学特性、工程和物理行为来研究材料。由于结构材料的弱点,常常限制了工艺上能够达到的水平,因而这门新的科学是重要的。人们不再认为材料只是天生就存在的,因为人们能够通过对材料行为的认识,从而进一步地改进和提高它们。历史上存在的金属与非金属工艺之间的巨大差别已经消失,这是因为已经认识到强度并非金属材料所独有。而非金属材料在强度和轻质方面恰恰提供了某些最佳的结合,在现有材料中强度最大的是碳和陶瓷的晶须。

复合材料的出现实现了材料科学家的意愿,即按照他们的设想用途来裁剪并制造出实用的产品。人类从古代已经学会使用增强材料,而且一些操作方法类似于现代工艺中经过精心选择的方法。这些传统的方法包括,在弱而脆的材料中掺入少量的纤维状的添加剂,以改善其强度和韧性。例如在粘土里掺稻草或在灰泥中加入马鬃;或向熟石膏里加纸浆和往磷酸盐水泥中加石棉纤维等;还提出过把木浆掺入水里制成冰山,用它作为战争期间在中大西洋里使用的航空基地。

广义地说，纤维状添加物的作用，是阻止或转移裂纹的扩展，而这些裂纹处于平均应力远低于理论应力情况下，即能在应力集中区内扩展，从而造成材料的脆性。但是，在上述基体中加进的增强剂不能超过百分之几，否则就难于操作，因而需要采用将基体加入纤维中的方法。随着三聚氰胺树脂和热塑性树脂的出现，大规模地使用纤维素、纤维层压板也就开始了。在需要防潮时，可用玻璃纤维来代替有机纤维。

在非金属材料领域中，这些很有用的发明已经提供了用它来代替金属材料制作零件的许多实例，例如凸轮、齿轮、轴承等等。虽然复合材料的成本比金属原材料高一些，但是它的制造成本较低，因而可以得到补偿。那末，是否能象目前正在大量使用的金属材料那样得到广泛的使用呢？实际上，我们目前对金属材料行为的熟悉，在很大程度上是基于能取得需要的特性，例如：控制位错移动以改变延展性。在基体包围晶须或连续纤维的复合材料中却要求位错静止。在高温使用条件或在恶劣环境条件下，如热核聚变反应器所预先考虑到的条件，都要求材料有可靠的力学性能，因而鼓励人们专心而集中地致力于对高级复合材料性质的研究。

目 录

引言.....	v
---------	---

第一部分 基本设计概念和制备

1 复合材料的进展.....	1
2 金属基复合材料的基本设计概念与制造的具体方法.....	4
3 自身生长的复合材料：形成和形态.....	53
4 结构用复合材料的设计基础.....	74

第二部分 在长丝、纤维和基体方面的进展

5 长丝和纤维的进展.....	90
6 纤维增强脆性基体.....	110
7 含有二维平面增强剂的复合材料.....	129
8 复合材料的界面.....	151

第三部分 物理和力学性能

9 非结构用复合材料的物理性能和设计.....	183
10 复合材料的力学性能，基础研究：复合材料的蠕变性能.....	205
11 复合材料强度的统计计算.....	232
12 定向共晶复合材料的力学性能.....	243

第一部分 基本设计概念和制备

1

复合材料的进展

P. Schiller

意大利 Ispra 研究院联合研究中心材料科学部

自从人类开始制备人工制品以来，必须解决的问题是如何获得最合适的材料。很早以前，人们就已经知道用最好的石头制作斧子和用最坚固的木材作拱形结构。以往，对于一个具体任务，常常是以力学性能作为选材的依据，随着技术的进展，其它的性能也变得重要起来，但在许多实际应用中仍以力学性能为主。

原先人们只会在已有的材料中寻找较好的材料。然而，科学发展到今天，随着人们对包括坚固材料在内的各种材料的基本机理知识的掌握，已开始制造新的材料。这个演变过程是从对材料作某种处理以改进其性能开始，进而生产出自然界中并不存在的材料，例如砖。

当金属材料出现时，上述的演变过程逐渐变得更快更重要了，因而如何改进材料和金属的某些性能成了技工们严守的机密。当然，大多数的改进多少是带有一点偶然性。在工业化时代的初期，前几个世纪内积累的丰富知识足以确立如何获得较好的或不同性质材料的某些规律。

回顾以往，使人们认识到大多数科学的发展有它们的相似性，在前几个世纪里，冶金工业的发展相当缓慢，而在最近一百年内步子却迈得很快。

在冶金学领域内，我暂时不谈自己的观点，但要指出它能够构成一种新材料之前，在其首要原理上需要有两个发现。第一是了解到金属有一个晶体结构，其次是如何制造出几乎是纯粹的材料。有了这样的基础知识才有可能发展固体的原子理论、塑性理论和位错理论，并用试验来证明这些理论。值得庆幸的是，今天我们可以说已经能在这些理论的指导下研究出新的合金。

改进金属的机械强度的可能性是：

- (i) 塑性变形；
- (ii) 固溶体；
- (iii) 弥散第二相；
- (iv) 掺入比基体更强的纤维。

前三条措施在人们懂得强化理论之前就已经采用了。在冶金领域里，锻造就是技工们硬化金属的一种最古老的例子。将金属加热使它软化，从而能够制成不同的零件，由于变形本身也是个硬化过程。通常所使用的许多金属和合金都是固溶强化或弥散强化的，由于它们并不是纯粹物质，因此含有一些固溶体或第二成分相。加纤维使金属强化的方法是一种相当新颖的方法，所以仍有待进一步发展。

我们可以广义地把弥散强化和纤维增强的金属称为复合材料。

联合研究中心在这两方面都做了工作。在前几年，在这个组织的第一个双年度计划中，大量的内容是致力于弥散强化的材料，特别是烧结铝粉(SAP)。后来由于计划的更改停止了这方面的工作。最近几年已把精力转向对纤维增强材料

的研究。

Ispira 课题的主要对象是专心致力于最新的和最先进的硬化方法，即用纤维来增强金属基体的研究工作。在地球上出现人类以前，自然界中的木材就是这种结构。很早以前人们就学会用泥浆和稻草制造很好的土砖。然而这一原理在一段漫长的时间里没有得到发展，直到本世纪采用钢筋增强混凝土、采用各种类型的纤维增强橡胶作轮胎和后来用玻璃纤维增强塑料等一些实例，才有了发展。在用纤维增强的概念中，最新的基体类型是金属。

对于上述粗略列举的一些不同基体的复合材料，首先遇到的问题是如何制备它们。当然还有些其它的问题，如正确地选择纤维和基体，纤维与基体的相互作用，复合材料的试验，理论分析以及在此基础上设计新的复合材料。最后一点应该说明的是，为了复合材料最合理的应用要研究设计准则。这一点是应特别强调的。

注意一下最近复合材料讨论会的论文，每个人都可以看到越来越多的著作在讨论这方面的问题。我们的宗旨不是讨论高级复合材料，而是要向大家介绍材料科学中这一更有前途的新领域，并引导大家注意复合材料研制工作中的最新进展。

2

金属基复合材料的基本设计概念与 制造的具体方法

A. Berghezan

比利时 Catholique 大学金属物理实验室

1. 引言与背景

在我们讨论有关复合材料制造的具体问题和列举或集中注意力于制备这些新材料的最主要的方法之前，必须在一开始就尽可能正确地定义复合材料并说明它的含义。

所以要下定义是因为在当今的许多科学家中，甚至在材料科学家中，对复合材料实际存在着几乎难于置信的混乱概念。某些科学家把它的范围说得很宽，而另外一些科学家却把它的定义下得很具体，范围相当狭，因而在深入具体内容之前，有必要对我们准备讨论的复合材料下一个严格的定义。

用得最广的一种定义是由 Javitz^[1] 提出来的。他认为“理论上，任何非纯粹的或含有多于一种组分的物体都可以归入复合材料之列”。

根据这个定义几乎所有的天然物质象木材、骨骼、贝壳等，同样某些人造材料诸如粉末冶金制品、电绝缘材料、由树脂胶粘的磁性材料、填充粉末的塑料以及纸质层压板均属于复合材料。

这个定义的不足之处是仅仅指出了复合材料是由几种材料混合组成的,然而并没有明确说出它的特征和组成规律,而这些正是决定了它与很普通的毫无意义的混合物的区别。

另一方面, Kelly^[2] 十分明确地强调不能把复合材料仅看成是两种材料的简单的结合,虽然形式如此,但从现代技术角度来看,它具有更广阔的意义,即这种结合能保留原材料各自的特性。在强度或绝热阻抗以及某些其它所需要的性能方面,复合以后能比其原组分中任何一种优越,甚至根本不同。

显然,上述第一个定义仅以组分的数目为基础来区分复合材料,会把许多实际上不是真正的复合材料的其它材料也看成为复合材料。因此我们需要寻找另外的更符合需要的更精确的定义,以便把真正的复合材料与其它的多相混合材料严格地区别开来。

现在我们试图引用除了 Kelly 的严格定义以外的更能符合要求和足够精确的一些定义,以便能够鉴别不同作者各自主张的观点。我们希望通过这样的分析,有助于提出对这些有意义的材料的设计原理。我们将在下面回顾其中的三种。

第一种定义实质上是用于区别合金与复合材料。其原文如下:

“复合材料是**不同于**合金的一种合成材料,在这种材料里每一种组分都保留着它们独自的特性,构成复合材料时仅取它们的优点而避开其缺点,以便得到一种改善了的材料”(Berghezan^[3])。

第二种定义强调它们在使用期内的多种功能:

“复合材料是多功能的材料系统,它们提供任何单一材料所无法获得的特性。它们是由两种或多种成分不同、性质不同、有时形状也不同的相容性材料以物理结合而成的”(Javitz^[1])。

最后,我们引用在设计原理中用得较多的第三种定义:

“纤维增强的复合材料仅是一种多相材料,它是由各种原材料组合和粘接制成的单一结构材料,并具有与其原材料极为不同的性质,如果原材料性能是能够互补的话,就能得到对比于原材料或原材料的混合体而具有相加和或叠加性能的复合材料”(Berghezan^[4]).

以上这些定义清楚地说明了在设计与制造复合材料过程中,由于**叠加**效应必定在复合材料结构中起作用,因而能够获得一种新材料,它具有比单独的原组分材料或其混合状态好得多的性能。

叠加效应可比喻成下面的关系:

$$A + B = C$$

$$2 + 2 = 6$$

用这种概念来表明由(A)、(B)两种不同材料结合得到的新材料(C)比原组分(A)或(B)具有更佳的性能并非新鲜。冶金学家早就期望选择一些由单组分组合起来并能使各单组分扬长避短的单一材料。

长久以来,这个梦想未能得到兑现。以陶瓷而言,曾经试图通过陶瓷粉末与某些经选择的金属粉末混和,以获得既具有陶瓷的非常高的硬度和抗氧化性,同时又至少部分保留金属延展性的新材料。

众所周知,大多数成型后的陶瓷的内部,有着多得惊人的缺陷。这是不足为怪的,因为由(A)和(B)组成的新材料,可以想象每一组分既有好的性质又有某些有关的弱点(图1)。

因此,新材料保留了原组分的性质,既有良好性质的混合也有(A)和(B)缺点的混合,这是并不奇怪,甚至在极端情况下也可能仅保留好的性质或仅保留坏的性质。实际上陶瓷

往往出现后一种情况，尽管做了大量的工作也是证实俗语的

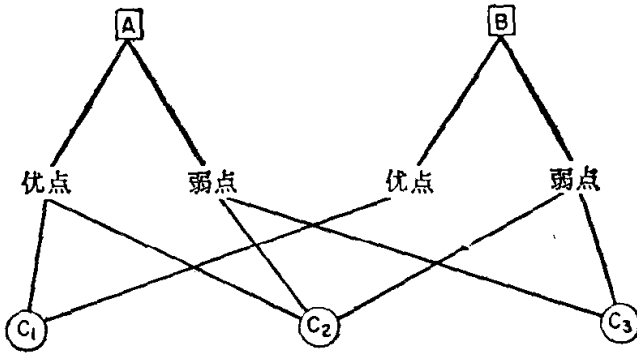


图 1

“气恼原则”*。

后来，一位名叫 Richard Young 的航空工程师偶然地将玻璃纤维与环氧树脂混合在一起，成功地得到了一种“奇怪”的材料，这件事发生在 1947 年，但是一直到 1960 年才认识到这种“奇特”材料的性质并把它称为“复合”材料。它的行为完全不同于当时已有的在其结构具有多种组分的所谓复合材料。

用当时具有的知识已无法解释从这种第一个人造“真正的”复合材料上所测出的性质。在这种情况下发展了纤维增强的新理论^[5-8]，它引导人们进行谨慎地设计和成功地制备其它类型的复合材料。

这些新的材料不仅非常好地证明了纤维增强理论，而且揭示出一种崭新的制造材料的新手段已被发现了。

2. 设计原理

对于制备一种好的材料来说，人们应不仅满足于巧合，而

* 经常发生的令人气恼规律，即涂了奶油的面包片不小心掉下时，常常是涂奶油面着地。

且还应能设计它,从而完成预想的功能,这一点确实是可能的。

设计复合材料也确实是可能的,不过在这种情况下,人们必须具有足够的理论,这种理论能为任何材料混合提供务必遵循的基本原则或定律,从而确保制备出的材料有真正的复合材料的性质,这一点跟合金的情况不同。

为此,懂得纤维增强的机理,对于任何一种复合材料的**正确设计以及成功的制作**都是十分重要的。

由于我们现在谈论的是有关这类材料的设计原理,因此首先让我们了解一下从现有理论中所直接获得的设计参数和设计要求。

由这种理论提出的最明确的设计要求是**选择单元组分**。

(a) 然而,如果没有某些选择的准则,那末也不再能进行**选择**,换句话说,要取决于选择的目的。在这种情况下,选择的目的是**挑选最合适的单元组分**,这些单元组分在构成单一的复合材料结构时,有希望能按照预先给定的功能而实行。

(b) 由此可以发现,设计者的首要任务并不是选择的本身,而首先应该**事前明确**各单元组分在使用时应承担的功能。例如,如果欲设计的复合材料是用作结构的,那末必须明确其中一种组分单元起承受载荷的作用,这就是之所以应该选择强劲的单位组分,而其它的组分单元应起传递载荷给它强劲的同伙的作用的原因,所以必须选择较软弱的基体材料。这样,就可设计出弹性屈服,如果必要时甚至选择出现塑性屈服的复合材料。

因而,对于一个成功的设计来说,仅仅考虑组成复合材料结构的各个单元的性能是**不够的**,还必须联系到整个复合材料结构来考虑。这是一项完全可由电子计算机来很好完成的工作,但是为了能按预先设定的功能来使用,甚至在恶劣环境中使用,我们还要做更多的事情,要比计算机所做的工作多得

多。

一项成功的设计不仅取决于被选用的单元组分的力学性能，而且这些单元组分还应满足已考虑到的各项使用要求的性质，这就是说，一个正确的设计原理，就应该知道怎样做和如何做，以便制备出性能符合要求的复合材料。

为了更好地领会由单元组分进行设计的过程中遇到的某些要求的含义，我们通常把它设想成一对单元组分并结合起来形成一对“佳耦”如果可能的话可想象成一对理想的“配耦”（结合体）。那末可以说，在设计与制造复合材料的过程中，我们必须使它能成为一种理想的结合体。

为此，在设计的最初阶段，就要特别注意组成复合材料的各组分之间的**相容性**（包括物理、化学、力学等方面），使它们能彼此和谐地在一起并发挥作用，即使在最恶劣的环境中也能如此。例如在任何使用环境中，它们的伸长、弯曲和应变都应相同或彼此协调一致。

所以，为了真正地抓住与制备这些新材料有关的问题，人们必须以相同的尺度来看待它们，并按相同的原理来设计它们，而这种设计原理将用于真正的配合体。

当然，这些原理对于保证成功地制备良好的复合材料还是不充分的，为了确保制出良好的复合材料还应该预先把某些主要的参数和某些需要满足的重要要求考虑进去。

这里列举了两条要求：即预先确定使用中所要求的功能和选择最合适的原材料来满足这些要求。此外，我们还将列出一些其它的要求。

（c）预先确定单元组分的特性和它们在复合材料中具有的特殊功能是不够的，我们需要的比这些更多，为了使单体组分在最后制成的复合材料中能起到预期的作用，还必须按所起的作用而精确地确定它们的几何形状。

因而，应把最强的组分制成长条形状，最好制成纤维状、带条状或薄箔状，由较弱的组分把各个单一纤维包围起来并粘接成为单一的结构，这种结构在最终成为复合材料时表现出所需结构的良好图象。

作者认为陶瓷的断裂不仅由于对各组分之间的粘接状态无知，而且也由于不知道对它们的几何形状(即其中的一种组分为纤维状)有所要求的缘故。这就是为什么这种材料从来没有实现过对它们寄予的期望。

说得更精确一点，即为什么一直等到一位航空工程师与玻璃纤维之间建立的偶然联系，才发现这种“长头发状”的纤维在实现这种成功的结合中是不可少的，才制成了一种成功的复合材料。

但是，还不止如此。

(d) 还必须记住复合材料与合金的不同之处在于最终形成的复合材料中，单元组分必须保留着自己固有的特性。

因而就无须以任何方法来改善基体的性能，即不必用一种或其它种可用的强化机理，例如固溶硬化或沉淀硬化的方法来改进基体的强度或硬度。

基体仍保持着它固有的软弱性质，这是它所起的作用不同的原因，因为在复合材料中基体是不承受载荷的。它仅传递载荷给强劲的纤维，这是符合预定的假设的。

(e) 最后还必须提到的是，单纯地保持单元组分的特性还是不够的，而必须把它们看成是结合成新材料的一部分，使之在使用过程中仍能发挥单元组分的长处而避开其短处。

倘若能成功地制备出这类复合材料，那末用此观点可以解释这一惊人的特性，即复合后的性能总是优于单元组分有效性能的总和。这样也就能解释前面提到的叠加效应： $2 + 2 = 6$ 。

在制造过程中，除非能将被指定的性能成功地引入复合材料中，否则上述的效应是不能体现出来的。这就完全意味着人们必须在使用中只发挥单元组分的特点并降低或隐藏它们的缺点。

总之，制备复合材料不仅仅是不同组分的简单组合件的制备，而必须使它们真正地结合成为一个完整的整体，它本身代表一种新材料。在其中，原始的组分依然保持着它们特有的性质，并且在使用过程中仅需要用其优良性能。至于组分的弱点则是借助配偶单元组分的掩盖作用来使之消失。

看起来好象是不能置信的，然而在优质的复合材料中，确

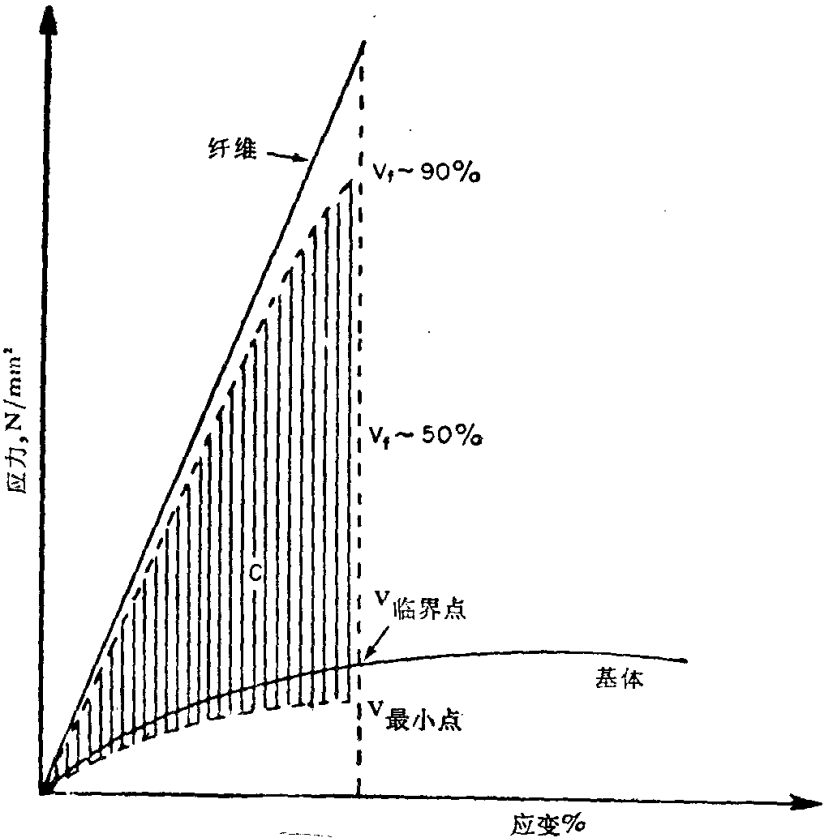


图2 脆性纤维的应力-应变曲线图解，一种金属基体，一种复合材料
(虚线包围的区域取决于纤维体积分数)

实存在这种情况。

那末是什么缘故呢？

当对复合材料施加一个递增的载荷 P 时（见图 2），弹性模数比较低的基体首先出现屈服，而被这种较弱的基体包围着的纤维不会“躲藏”起来，它们有能力承受这些载荷。实际使用中基体的弱点是不会表现出来的，因为纤维能承受的载荷要比基体的破坏强度高得多，这种高度抵抗作用就把基体不能承载的弱点掩盖了起来。相反，由于基体包覆着纤维，所以它能起在载荷下抵抗大气或环境的侵蚀作用。这就是基体能保护纤维抵抗氧、腐蚀，同时也防止了任何机械损伤如风蚀、划痕等。

现在让我们试设计一种用于高温条件下的典型复合材料。

假如我们已经有了—些用于高温的、强度很高的纤维，可是不幸的是它们会很快被氧化而降低性能。显然在高温的大气状态下是无法使用它们的，实际上这种易被氧化的纤维依然可作为高温复合材料的极好的候选者，因为复合材料有另外给定的功能使之能满足要求，此时基体（例如超耐热合金）已将纤维保护起来，从而使它能充分发挥承载的作用，使得纤维的氧化问题已不复重要了。

因此，每一组分在使用中都发挥了它们的特点，而各自的短处正好被对偶组分的优点所掩盖。为此，它们总是以一种联合的配偶形式存在着。

当然，重要的是应在制造过程中始终保持这种协调性。如果基体未能将纤维保护好使之免受侵蚀，那末纤维的强度就会遭受损失，复合材料将发生突变性的断裂。因而在制造过程中应尽力避免这些情况的发生。

Desforges^[9] 在试验中发现了一个很有代表性的例子，以