

肯尼思·G·克雷德 主编

# 金属基复合材料

温仲元 等译 李云盛 校

# 金属基复合材料

肯尼思·G·克雷德 主编

温仲元 等 译 李云盛 校

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了金属基复合材料的基本原理、当前主要金属基系统(硼-铝、石墨增强金属、纤维增强钛、定向凝固共晶高温合金、难熔丝-高温合金、氧化铝-镍、层压金属)的相容性机理、反应防护措施、工艺过程、材料性能和用途。本书可供有关材料专业科研人员、航空宇航、冶金化工工业部门专业人员以及高等院校有关专业师生参考。

Metallic Matrix Composites

Kenneth G. Kreider

Academic Press 1974

\*

### 金属基复合材料

肯尼思·G·克雷德 主编

温仲元 等 译

李云盛 校

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 15 384 千字

1982年10月第一版 1982年10月第一次印刷 印数: 0,001— 4,000册

统一书号: 15034·2363 定价: 1.85元

## 译者序

人类使用复合材料的历史虽然悠久，但复合材料作为材料科学中的一个专门学科只是最近二十多年的事。近二十年来，由于现代科学技术对材料不断提出新的要求，也由于材料科学本身的技术水平不断提高，促使复合材料迅速发展，品种日益增多，并在各个不同的领域中得到越来越广泛的应用。在五十年代玻璃纤维增强塑料（玻璃钢）得到了很大的发展，而六十年代又研制出许多像碳、硼这样的高性能增强纤维。在基体方面除树脂以外，又使用了金属、陶瓷等其他基体。特别是在航空宇航领域，只有研制并采用新型高比强度和高比模量的结构复合材料，才能大大提高飞行器的性能。因此目前世界上科学技术先进的国家都在大力发展复合材料。为了赶上世界先进水平，实现四个现代化，我国把发展复合材料作为材料科学中的重要项目之一。

金属基复合材料是复合材料两大类别——金属基与非金属基——之一。与目前广泛应用的树脂基复合材料相比，金属基复合材料具有横向机械性能好、层间剪切强度高、工作温度高、耐磨损、导电导热、不吸湿不放气、尺寸稳定、不老化等优点，引起各国的重视。特别是在硼-铝、碳-铝、定向凝固共晶高温合金等方面，目前都有重要进展，其预期用途包括飞机和卫星的各种构件、涡轮喷气发动机的风扇叶片和涡轮叶片等许多重要部件。这些材料的应用将给航空宇航技术的发展带来一些重大的变革。然而，金属基复合材料由于工艺复杂、价格较贵，目前在发展水平上还落后于树脂基复合材料，仍处于研制和试用阶段。但是，随着科学技术的发展，在不久的将来，金属基复合材料一定会和非金属基复合材料一起，共同成为先进复合材料的两大支柱。

国外在复合材料方面进行了大量的工作，发表的文献资料很

多。1974年美国出版了一套名为“复合材料”的书籍(“Composite Materials”, L. J. Broutman、R. H. Krock 主编),系统地报道与总结了复合材料方面的科研成果。全书共分八卷:

- 第一卷 金属基复合材料的界面;
- 第二卷 复合材料力学;
- 第三卷 复合材料的工程应用;
- 第四卷 金属基复合材料;
- 第五卷 断裂与疲劳;
- 第六卷 聚合物基体复合材料的界面;
- 第七卷 结构设计与分析(I);
- 第八卷 结构设计与分析(II)。

本书根据第四卷译出。在金属基复合材料研制方面,美国一直居于领先地位,所进行的工作远较其他国家为多。本书全面总结了74年以前主要是美国在金属基复合材料方面的研制工作,对各种主要的金属基复合材料体系的相容性机理、工艺过程、性能和用途作了系统的阐述,既有原理,又有实际,并引用了大量的文献资料,内容丰富,是一本有价值的基础性参考书。我们结合工作需要,并考虑到国内有关复合材料的专业书籍很少,特别是金属基复合材料方面还没有一本合适的专业性参考书,因此翻译出版本书,供有关专业人员以及高等院校师生参考。

本书由北京航空材料研究所有关工作人员翻译。参加本书翻译工作的有:温仲元(第一、三、五章)、戴永耀(第二章)、强俊(第四章)、汤道坤(第六章)、汪雨生(第七章)、于琨(第八章)。由温仲元、于琨汇总整理,李云盛校。对于原书中的印刷错误,一般都参考有关资料进行了更正。有些地方虽发现有误,但没有足够依据,不便更动,只能保留原状。原书前言、作者索引、主题索引均略去不用。为了便于不同单位制之间的换算,书后附有单位换算表。由于水平所限,译文中可能有错误或不妥之处,希望读者批评指正。

# 目 录

第一章 金属基复合材料导论(K. G. Kreider) .....	1
§ 1.1 引言 .....	1
§ 1.2 金属基复合材料 .....	3
§ 1.3 金属基复合材料的种类 .....	7
§ 1.4 金属基复合材料的强度 .....	14
§ 1.5 金属基复合材料增强物的种类 .....	25
§ 1.6 复合材料组分的相容性 .....	29
§ 1.7 非重点介绍的其它系统 .....	32
参考文献 .....	34
第二章 层压金属复合材料 (E. S. Wright, A. P. Levitt) .....	36
§ 2.1 引言 .....	36
§ 2.2 金属层压板的制造方法 .....	38
§ 2.3 层压金属复合材料的性能 .....	48
§ 2.4 选用金属层压板的技术标准 .....	70
§ 2.5 小结及评价 .....	96
参考文献 .....	99
第三章 定向凝固共晶高温合金(E. R. Thompson, F. D. Lemkey) .....	101
§ 3.1 引言 .....	101
§ 3.2 相系探讨 .....	103
§ 3.3 合金制备技术 .....	118
§ 3.4 力学性能 .....	121
§ 3.5 环境影响 .....	144
§ 3.6 零件制造 .....	150
参考文献 .....	153
第四章 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纤维增强的镍基合金(R. L. Mehan, M. J. Noone) .....	156
§ 4.1 引言 .....	156

## VI

§ 4.2	镍和镍合金中的蓝宝石晶须 .....	158
§ 4.3	镍和镍合金基体的增强物——蓝宝石杆 .....	162
§ 4.4	蓝宝石-镍合金复合材料的制造和性能 .....	189
§ 4.5	小结 .....	219
	参考文献 .....	221
<b>第五章</b>	<b>难熔金属丝增强高温合金(R. A. Signorelli)</b> .....	<b>224</b>
§ 5.1	引言 .....	224
§ 5.2	相容性问题的论证 .....	226
§ 5.3	基体-纤维反应的控制 .....	237
§ 5.4	纤维的研制 .....	240
§ 5.5	基体合金的研制 .....	245
§ 5.6	制造方法 .....	250
§ 5.7	难熔丝-高温合金复合材料的性能 .....	253
§ 5.8	小结 .....	259
	参考文献 .....	261
<b>第六章</b>	<b>纤维增强钛合金(A. G. Metcalfe)</b> .....	<b>263</b>
§ 6.1	引言 .....	263
§ 6.2	各种方法的探讨 .....	264
§ 6.3	复合材料的研制 .....	285
§ 6.4	钛基复合材料的现状和未来 .....	309
	参考文献 .....	314
<b>第七章</b>	<b>高模量石墨纤维增强金属基复合材料的发展</b> (E. G. Kendall) .....	<b>316</b>
§ 7.1	引言 .....	316
§ 7.2	石墨纤维 .....	318
§ 7.3	石墨-金属复合材料系 .....	333
	参考文献 .....	395
<b>第八章</b>	<b>硼增强铝(K. G. Kreider, K. M. Prewo)</b> .....	<b>399</b>
§ 8.1	引言 .....	399
§ 8.2	材料的选择 .....	402
§ 8.3	复合材料的制造 .....	406
§ 8.4	二次加工 .....	421
§ 8.5	机械性能 .....	427
§ 8.6	硼-铝复合材料的工程应用 .....	465
	参考文献 .....	469
<b>附录</b>	<b>单位换算表</b> .....	<b>472</b>

# 第一章 金属基复合材料导论

国家标准局 应用技术研究所

Kenneth G. Kreider

## § 1.1 引 言

现代技术对材料的要求越来越高。在动力结构方面，不但要求强度高，还要求重量轻，因此对更佳材料的要求尤为强烈。材料对结构效率的改进，会影响到象飞机、高速运转机器、发电设备和宇航设备一类动力结构的效率。由于构件和主要设备的尺寸越来越大，材料的结构效率问题日益显得更加重要。这些大型结构的例子有 747 客机、阿波罗载人宇宙飞船、大型造纸机和纺织机，以及在缅因州威斯卡塞特的大型缅因扬基气轮发电机。设计这些结构时遇到的一个关键问题是所谓平方-立方关系，即结构的强度和刚度随线尺寸的平方值（横截面积）增加，而重量则随线尺寸的立方增加。为保持结构的强度和刚度，必须采用新的设计方法，并要求材料有更高的强度和刚度。

刚度或结构稳定性是结构设计的主要性能之一。相应的重要材料性能就是比模量（弹性模量与密度的比值）。工程材料如钢、铝、钛和玻璃等具有相似的比模量，而有机材料的比模量低些。这意味着，设计人员通常必须采用低比重材料及在不超重的条件下增加构件的截面尺寸来保证结构的挠曲刚度或弯曲刚度。但在许多结构中这样做是不切实际的，从而需要比刚度更高的材料。硼和碳是共价键结合材料，比模量高达  $15 \times 10^8$  厘米 ( $6 \times 10^8$  英寸)，大大高于金属键结合和离子键结合的材料。象碳化硼、碳化硅和氧化铝等以共价键结合为主的其它一些材料也具有高的比模量。为



了达到最高的比模量，不但要求材料在固态具有高的共价键结合分量，而且应具有低的原子序数。一些工程金属，如铝、钴、铜、铬、铁、镁、镍、钛的比模量在  $1.3 \sim 3.5 \times 10^8$  厘米范围内<sup>●</sup>。而有机聚合物的比模量一般要低得多。

遗憾的是，象硼和碳化物这类高比模量的材料不可能制成大型工程结构。加之这类材料的脆性和对裂纹与缺陷具有相当大的敏感性，使得大截面材料的强度很差。事实上，如果在工程结构中不能同时达到高的强度，这种高的比模量一般还是利用不上的。由于金属合金性能的再现性好，在张力载荷下具有一定的强度和韧性，因此被公认为大型动力结构的主要材料。

设计中除了刚度是关键性的问题以外，许多结构还遇到使用条件下的寿命限制问题。这方面的限制因素涉及到疲劳强度、高温持久、应力腐蚀、缺口和缺陷周围的裂纹扩展等。虽然为改善材料的静态性能，曾采用各种强化机制使合金大大强化，但在动态使用时却常常使韧性和寿命受到损失。研究复合材料的重要目的之一就是在提高材料静态强度和动态强度的同时，降低材料对裂纹和缺陷的敏感性。在动载条件下，用复合材料的弹性部分吸收载荷，比用那种会受累积损伤的塑性部分（韧性金属）更能提高材料的动载特性。通过将材料中累积损伤的方向改变到不会降低承载能力的方向上，可以降低材料的缺口敏感性。

总之，研究复合材料系统的目的在于充分利用共价键结合材料的高比模量和尽量减少非弹性体受动载时会导致结构破坏的累积损伤的影响。复合材料的概念就是一方面能兼有复合系各组元或组分的优点，另一方面又能克服各自的缺点，使新合成的复合材料具有优异的有用性能。

目前复合材料的定义应包括以下的内容：使高强度或高模量的增强物同作为第二种材料的基体相结合，所用的基体应允许复

● 原文  $1.3 \sim 3.5 \times 10^7$  厘米有误，经核对后改正。

合材料能加工成需要的工程结构，并能把周围载荷传递到承载的增强物上。这类复合材料的典型例子有钢筋混凝土，玻璃纤维增强塑料，尼龙增强橡胶以及木材。最后一项木材是由纤维素增强的天然生长的木质素。这类复合结构中最有代表性的例子是高达300英尺的加里福尼亚红杉。本书中复合材料一词的含义既不包括涂瓷钢或金包铜一类带保护层材料，也不包括那种主要为降低价格而加入填料的材料，如加填料的环氧或酚醛。

为了进一步明确本书中复合材料一词的含义，特列出下列几条标准：

(1) 复合材料的组元是人们有意选择和设计的。

(2) 复合材料本身是人工制造的，而不是天然形成的。

(3) 复合材料至少包括两种独立的不相同的化学相。

(4) 复合材料的性能取决于每种具有相当含量的组元相(第二相至少不低于20%)。

(5) 复合材料中的组元必须具有重复的几何形状，这样在相当大的范围内可以把材料看成是均匀的。这条标准不适用于蜂窝夹层结构或同轴电缆，对这些物件来说，作为一种结构看待比作为材料更加合适。

(6) 所研制的复合材料应该具有其单个组元所没有的优良性能。

## § 1.2 金属基复合材料

组成复合材料的组元材料应该是相容的和互为补充的。在高模量复合材料领域中，树脂基复合材料应用最广。在这类复合材料中所选择的与高模量增强物结合的基体，很容易加工成结构零件。此外，这种复合材料的两相之间几乎没有什么化学的或机械的相互作用，因此基体和增强物之间的相容性问题也很简单。一般说来，增强物(通常是纤维)在树脂加工的中温范围内是化学惰性的，基体具有相当大的弹性形变，这些都是解决相容性问题

的基础。而对于金属基复合材料，它的加工温度一般要高得多，基体的弹性模量比有机树脂基体高1~2个数量级。因此这种材料的化学相容性问题和机械（应力）相容性问题都要严重得多。在按系统论述的章节中将比较深入地对这两种相容性问题加以讨论。这里，我们只要认识到这些问题的重要性，以及这些问题的由来与基体和增强物的固有性能有关就可以了。

解决金属基复合材料的化学相容性问题有两种方法，或者采用低温（固态）加工工艺；或者选择相互平衡的热力学稳定的组元相。相应的热机械相容性问题也可以用两种方法解决，或者利用塑性基体的屈服和全部吸收热循环过程中不可避免的应变差；或者选择热膨胀系数比较匹配的基体和增强物。

另一方面，金属基复合材料作为结构材料还具有一系列和金属性能相类似的很重要的优点。金属合金所以能成为工程动力结构的主要材料也就是借助于它的这些金属性能。金属基复合材料兼有以下的综合性能：

- (1) 高强度；
- (2) 高模量；
- (3) 高的韧性和冲击性能；
- (4) 对温度变化或热冲击的敏感性低；
- (5) 表面耐久性好，表面缺陷敏感性低；
- (6) 导电导热性好；
- (7) 性能再现性好；
- (8) 在设计、制造、成型、连接、精整、使用寿命等方面有丰富的技术资料。

与结构陶瓷或有机材料相比，工程合金的高强度在复合材料中能得到更好的利用。在非增强方向上，基体强度对复合材料性能是非常重要的。如横向强度、抗扭强度及层间剪切强度等性能，通常都受基体控制。事实上，不但在静载条件下，而且在蠕变和疲劳载荷条件下也是这样。复合材料的结合强度或连接强度

同样受基体控制。利用金属的高强度，还可以制成含有一定比例增强物的预制品，以节省贵重的增强物。

与有机材料相比，金属合金模量更高，这对高模量复合材料特别显得重要。图 1-1 对几种纤维增强复合材料的比模量作了比较。要注意，虽然单向增强硼-环氧在增强方向上的比模量确实最高，但其整体比模量( $0 \pm 60$ 度伪各向同性)比硼矽克<sup>●</sup>-铝低得多。同样，纤维增强金属的剪切比模量也是比较高的。对于涡轮发动机风扇叶片和大型翼型件一类动力结构来说，这些比刚度特别重要。

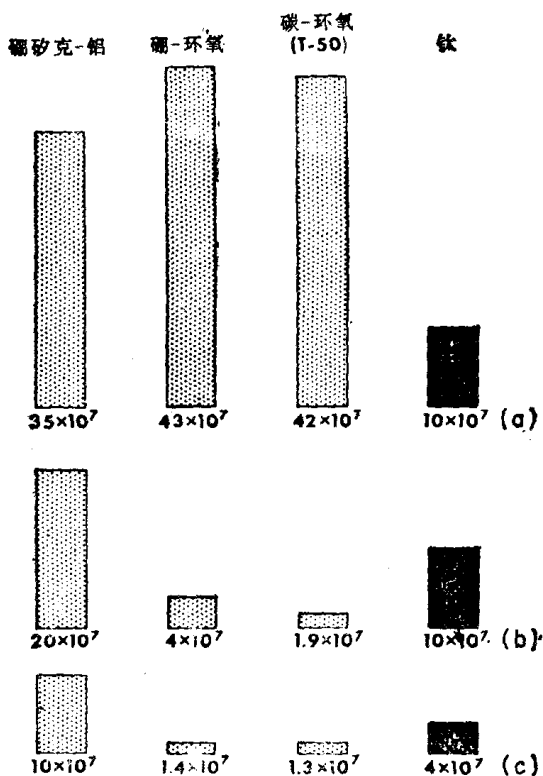


图1-1 某些航空宇航材料的比模量(英寸), 复合材料含50% (体积) 的单向增强纤维

(a) 纵向模量  $E_{11}$ ; (b) 横向模量  $E_{22}$ ; (c) 剪切模量  $G_{12}$ 。

● 硼矽克是美国联合飞机公司注册的一种商品名称, 指带碳化硅涂层的硼纤维。

复合材料中金属合金的高韧性和高冲击性能是非常重要的，因为增强物一般都是线弹性体，其本身的冲击性能不好。象铝、钛或镍铬合金等韧性基体，在受到冲击时能通过塑性变形吸收能量，这种特性对许多动力结构非常重要。韧性基体还能通过塑性变形使裂纹钝化和减少应力集中，从而改善材料的断裂韧性。

金属性能对温度变化不敏感，这对它作为高模量结构复合材料的基体材料是很有价值的。陶瓷材料的抗热冲击性能比金属材料差，因而常常使其应用受到限制。有机树脂基体的抗热冲击性能对温度变化十分敏感，特别在接近聚合物玻璃化温度时更为明显。树脂不仅在中温会变软，而且高温下的抗氧化、抗腐蚀性也大大降低。工程结构用的铝、钛和镍基合金对温度变化或热循环的敏感性都要小得多。

工程结构合金对表面裂纹的敏感性一般比陶瓷或有机树脂小，表面也比较坚实耐久。腐蚀、擦伤等引起的小裂纹，可能使陶瓷材料的强度激烈降低。这是因为陶瓷的弹性系数高，并且不能借助塑性流动使裂纹和缺口钝化。这些小裂纹就是重要的应力集中源，并使材料变弱。由于有机聚合物的硬度和强度均相当低，象擦伤、磨蚀或腐蚀等各种因素对表面都有显著影响。很多树脂还对湿度敏感，容易形成孔隙。此外，树脂对中温氧化和紫外线辐射也比铝合金和钛合金更加敏感。

金属基体合金的导电导热性强，因而可以使局部的高温热源和集中电荷很快扩散消除。如果这种冲击能（电的或热的）能够很快被传导开，象雷击，热气流冲击等问题就不再那么严重了。

金属基体最重要的优点之一就是这种变形金属性能的再现性最好。其它工程材料的机械、物理性能，就不如动力结构用的冶金合金那样能够得到精确控制。基体合金的这种特性对高模量复合材料也是非常重要的。对这种复合材料，不仅基体合金本身的性能很重要，而且结合性能和界面性能也应该是稳定的和能再现的。

为高模量复合材料选用的基体合金有个重要的有利条件，就是这种材料已经积累了丰富的工艺经验。这种工艺与它们目前的应用状况有关。这种应用状况是指工程构件的设计、复杂零件的制造(包括外形加工、成型和连接)、精整、涂复技术的研制以及关于使用寿命的大量资料等方面的情况。

总之，为了挖掘金属基复合材料在工程结构中的潜力，还需要进行复杂的工艺研究。在研制这些复合材料时，还必须认真考虑两相间的化学相容性问题和机械相容性问题。由于基体的高强度和模量，使基体和增强物之间的反应比树脂基复合材料更加严重。然而正是上述这些性能，使得金属合金能应用于工程结构，也使得合金作为工程结构复合材料的基体具有很大吸引力。

### § 1.3 金属基复合材料的种类

金属基复合材料可以用高强度的第二相得到增强。增强相的形状有三维的(颗粒)、二维的(薄片)和一维的(纤维)。每一种增强物都有各自的优点和特色。一般来说，由于这几种复合材料的机械性能和加工工艺有显著差别，因而其应用范围也各不相同。

#### 一、颗粒增强复合材料

这里的颗粒增强复合材料是指弥散的硬质增强相的体积超过20%的复合材料，而不包括那种弥散质点体积比很低的弥散强化金属。此外，这种复合材料的颗粒直径和颗粒间距很大，一般大于1微米，而弥散强化金属中的质点间距是0.01~0.1微米，这恰是产生位错摩擦的最好距离。象钨-碳化物-钴这样的颗粒增强复合材料，同本书中讨论的其它复合材料一样，增强相是主要的承载相，而基体用于传递载荷和便于加工。硬质增强相造成的对基体的严重束缚作用能阻止基体屈服，因此减小基体体积比一般能使复合材料强度线性增加。但这种复合材料的基体仍然能够屈

服和发生塑性流动，断裂延伸率能达到30%，这比薄片或纤维复合材料在脆性增强相方向受力时达到的延伸率要高得多。因为在薄片或纤维增强复合材料中，当复合材料延伸时，要求增强物本身也能够延伸。

三维增强物在三个垂直平面上都是对称分布的，因此得到的复合材料是各向同性的。然而颗粒增强复合材料本身是不均匀的，而且材料的性能不仅对组分性能敏感，对界面性能及颗粒排列的几何形状也十分敏感。颗粒复合材料的强度通常取决于颗粒的直径、间距和体积比。基体性能也很重要，其中包括能增加增强物束缚效果的加工硬化系数。Broutwau 和 Krock(1967)对无机颗粒复合材料作了评论。他们讨论了各种制备方法，侧重于各种烧结方法，还讨论了颗粒复合材料的性能，包括对这些复合材料性能的理论方面的讨论。虽然这类材料也是金属基复合材料的一个大类，但本书不准备包括这一类内容，而把重点放在定向增强复合材料方面，因为后一类材料作为一种新的材料工艺方法在很多方面都是富有代表性的。

## 二、层状复合材料

对本卷书来说，所谓层状复合材料是指在韧性和成型性较好的金属基体材料中含有重复排列的高强度高模量片层状增强物的复合材料。片层的间距是微观的，所以在正常的比例下，材料按其结构组元看，可以认为是各向异性的和均匀的。这类复合材料是结构复合材料，因此并不包括各种包复材料。在包复材料中层片是一种结构组元，环境保护包复层则成为结构材料的第二组元。碳化硼-钛复合材料是层状结构复合材料的一例。这种材料的多层增强结构组分是5~25微米厚的化学气相沉积的碳化硼薄片。第二个例子是Ni-Mo和Al-Cu类共晶复合材料，这类材料中，两相凝固成层状组织。这两种共晶复合材料都含有韧性金属基体相和高强度高模量的薄片增强相。

结构层状复合材料的弹性常数可以用层片理论 (Tsai, 1966) 预测。在增强板片的两个主要方向上, 弹性模量都可以按混合定则计算:

$$E_R V_R + E_M V_M = E_C \quad (1)$$

式中  $E_R$ 、 $E_M$  和  $E_C$  分别代表增强物、基体和复合材料的弹性模量。 $V$  代表体积比。

虽然各向异性材料的其它一些弹性常数推导更加复杂, 但还是可以精确预算的。

层状复合材料的强度和大尺寸增强物的性能比较接近, 而与晶须或纤维类小尺寸增强物 (一维的) 的性能差别较大。因为增强薄片在两维方向上的尺寸相当于结构件的大小, 因此增强物中的缺陷可以成为长度和构件相同的裂纹的核心。这种裂纹和纤维材料内的裂纹核心相比, 影响截然不同。在承受轴向张力的纤维中, 裂纹在纤维横截面上扩展, 而纤维的截面积相对整块材料来说是很小的。由于最重要的增强材料实质上都是脆性材料, 其强度与材料中缺陷的密度和大小的统计分布有关。因此这种脆性增强物服从 Griffith (1921) 的经典断裂力学, 并且其强度和其尺寸成反比。Weibull 曾论述过脆性材料尺寸对强度的关系, 并在本丛书第五卷中有更详细的讨论。本书对脆性材料的断裂力学未加论述, 但材料工程师们对这种强度尺寸效应应该是熟悉的。

由于薄片增强相的强度不如纤维增强相高, 因此层状结构复合材料的强度受到了限制。此外, 脆性增强物的断裂应变小, 也使复合材料增强平面各个方向上的延伸率和塑性都受到了限制。然而, 在增强平面的各个方向上, 薄片增强物对强度和模量都有增强效果, 这与纤维单向增强的复合材料相比则有明显的优越性。

### 三、纤维增强复合材料

本节讨论的内容包括纤维增强金属基复合材料的应力-应变



特性、强度和断裂特性。讨论的重点是具有较好韧性的低屈服强度基体和高强度高模量类脆性纤维的系统。象 McDaniels 等人 (1959, 1963) 和 Kelly 与 Tyson (1965) 对铜-钨进行的研究, Cratchley 和 Baker (1964) 对不锈钢丝-铝进行的研究, Dow 和 Rosen (1964) 对玻璃增强塑料进行的研究, 这些早期研究对弄清这个课题提供了重要的实验基础。

### (1) 应力-应变特性

McDaniels 等人 (1963) 和 Kelly 与 Davies (1965) 指出, 连续纤维单向排列的金属基复合材料在纤维方向受到应力时, 应力-应变特性曲线包括四个阶段。

如图 1-2 所示, 在第一阶段时纤维和基体都呈弹性变形。弹性模量可按下列经验公式计算:

$$E_C = E_F V_F + E_M V_M \quad (2)$$

式中  $V$  代表基体  $M$  和纤维  $F$  的体积比。Rosen 等人 (1964) 证明, 对于两相泊松比接近相等的复合材料, 公式 (2) 相当理论值的下限。该公式也同样适合于弹性-弹性压缩过程。对于两相泊松比相差较大的复合材料, 测得的模量值更高。因此在预测弹性阻抗

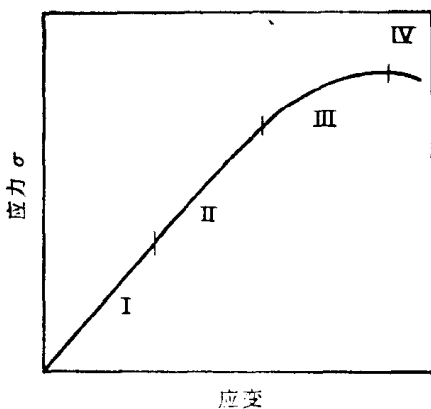


图1-2 金属基复合材料应力-应变特性示意图

- (I) 纤维弹性, 基体弹性; (II) 纤维弹性, 基体塑性;  
(III) 纤维塑性, 基体塑性; (IV) 纤维断裂。