

复合材料原理



陈刚
江苏大学材料学院

第二章

复合材料的复合原理及界面

第二章 复合材料的复合原理及界面

2.1 复合原则

2.2 弥散增强及颗粒增强原理

2.3 单向连续纤维增强原理

2.4 短纤维增强原理

2.5 混杂增强原理

2.6 复合材料界面及其改性

2.7 复合材料界面表征

思考题

根据连续纤维增强原理，举例说明采用哪些措施可以保证复合材料具有优异的性能？

优异的纤维性能、足够的纤维体积分数、与整体结构配合的纤维排列、良好的界面结合、基体具有良好的塑性、基体性能均匀。

2.4 短纤维增强原理

- 一、短纤维的作用特点及效应
- 二、高分子基复合材料增强原理
- 三、金属基复合材料增强原理
- 四、陶瓷基复合材料增强原理

一、短纤维的作用特点及效应

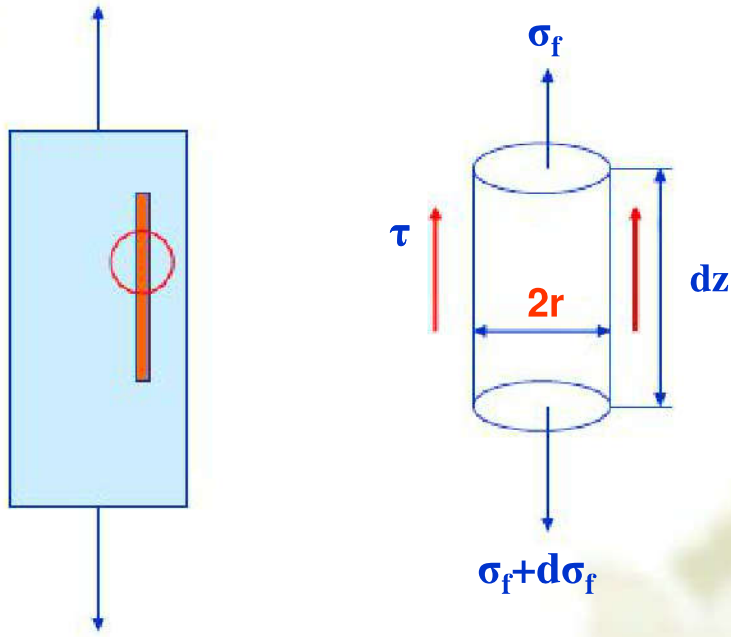
- ❖ 短纤维的含义
- ❖ 应力传递理论
- ❖ 弹性模量、强度与纤维长度的关系

1、短纤维的含义

- ❖ 短纤维一般指长径比小于100的各种增强纤维。
- ❖ 作用于复合材料的载荷不直接作用于纤维，而是先作用于基体材料并通过纤维端部与端部附近的纤维表面将载荷传递给纤维。
- ❖ 对于短纤维复合材料，端头效应不可忽略，同时复合材料的性能是纤维长度的函数。

2、应力传递理论

假设：纤维中部的界面剪切应力和纤维端部的正应力为零。



短纤维上受力分析

1) 应力传递分析

- ❖ 对于短纤维，最大应力发生在纤维的中部（ $z=1/2$ ）。
- ❖ 可以得到公式

$$l_f/d = \sigma_{fu} / (2\tau_y)$$

- ❖ 其中 l_f 是临界纤维长度； d 是纤维的直径； σ_{fu} 是纤维的强度； τ_y 是沿纤维长度的界面剪切应力，等于基体的剪切屈服强度。

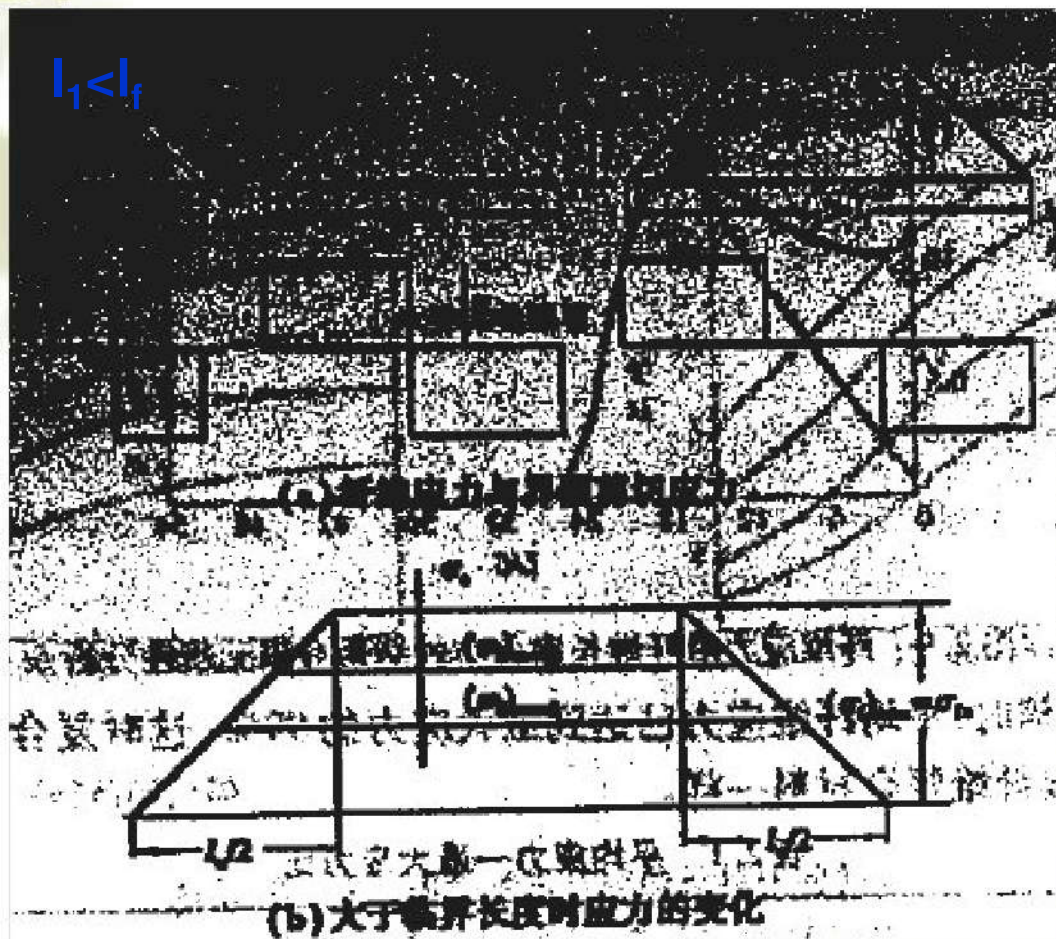


图2-7 纤维应力沿纤维长度分布

- ❖ 纤维的应力分布（径向应力和剪切应力）。
- ❖ 在纤维长度大于载荷传递长度时，复合材料的行爲接近连续纤维复合材料。

2) 应力分布的有限元分析

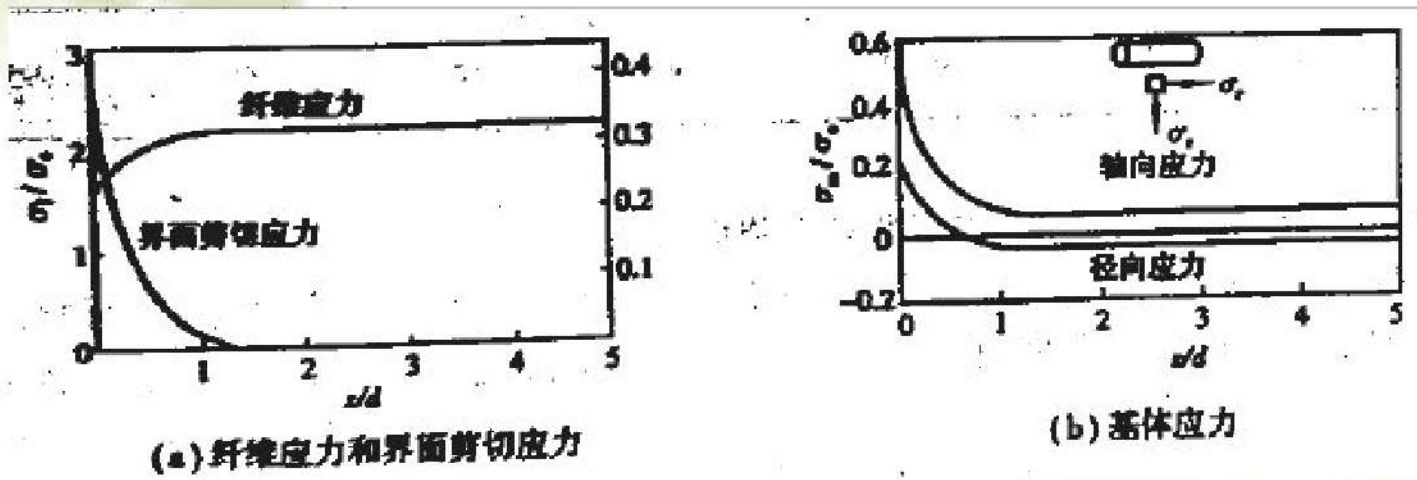


图2-8 纤维和基体上的应力分布情况

3) 平均纤维应力

表1 平均应力-最大应力比

	1	2	5	10	50	100
		纤维比应力	纤维比应力	纤维比应力		
		0.75	0.90	0.95	0.99	0.995

3、复合材料的弹性模量和强度

- ❖ 主要影响因素：纤维的长径比、体积分数、成分和强度等。
- ❖ 弹性模量与纤维长径比的关系见图2-10。

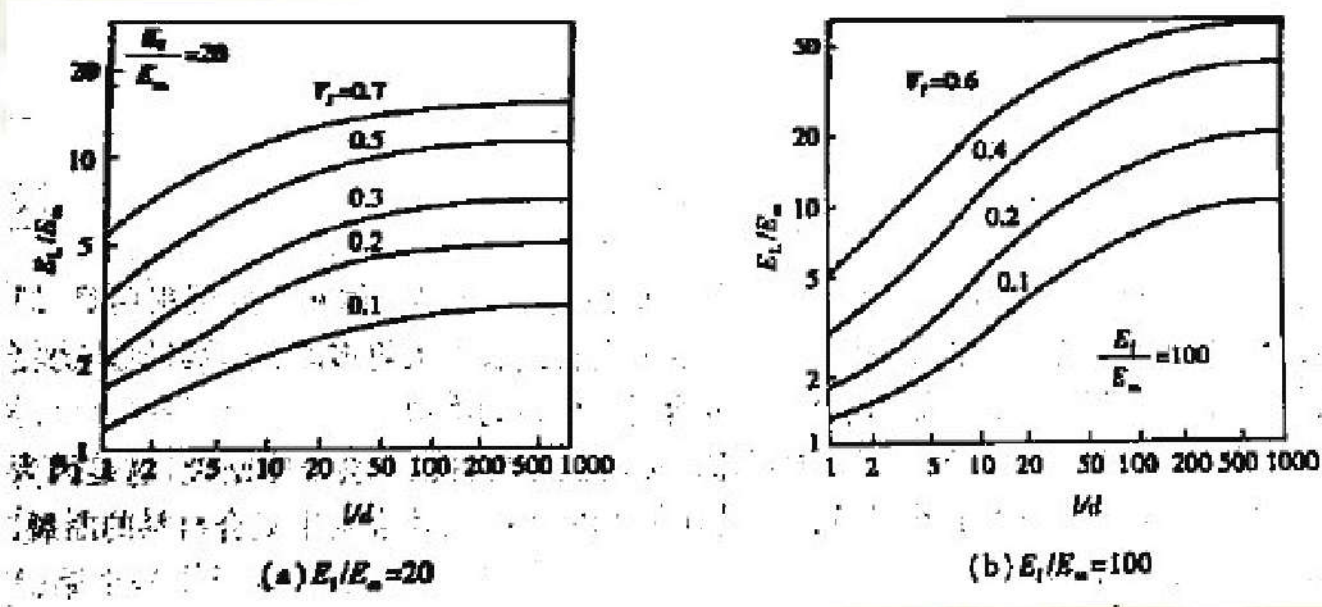


图2-10 纵向弹性模量与纤维长径比的关系

复合材料的强度

- ❖ 可以用混合法则表示单向纤维复合材料的纵向应力。
- ❖ 当纤维长度短于临界长度时，最大纤维应力小于纤维的平均断裂强度，无论外加应力多大纤维都不会断裂。
- ❖ 此时，复合材料的断裂发生在基体或界面上，复合材料的强度近似为：

$$\sigma_{cu} = \tau_y l V_f / d + \sigma_m V_m$$

- ❖ 当纤维长度大于临界长度时，纤维应力可以达到平均强度。
- ❖ 此时，可以认为纤维应力等于其强度，纤维将发生断裂，复合材料的强度为：

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + (\sigma_m)_{\varepsilon f} (1 - V_f)$$

其中 $(\sigma_m)_{\varepsilon f}$ 是纤维断裂应变为 ε 时对应的基体的应力。

- ❖ 与连续纤维复合材料相似，我们可以得到最小体积分数和临界体积分数 V_{\min} 和 V_{crit} 。
- ❖ 当纤维的体积分数小于 V_{\min} ，当所有纤维断裂时复合材料也不会断裂。
- ❖ 只有当基体断裂时，复合材料才会发生断裂，此时的强度为：

$$\sigma_{\text{cu}} = \sigma_{\text{mu}}(1 - V_f)$$

$$V_f < V_{\min}$$

二、高分子基复合材料增强原理

- ❖ 基本特点（塑性基体）
- ❖ 增强规律
- ❖ 遇到的问题（界面结合）

表 2 不同短 C 纤含量的复合材料力学性能

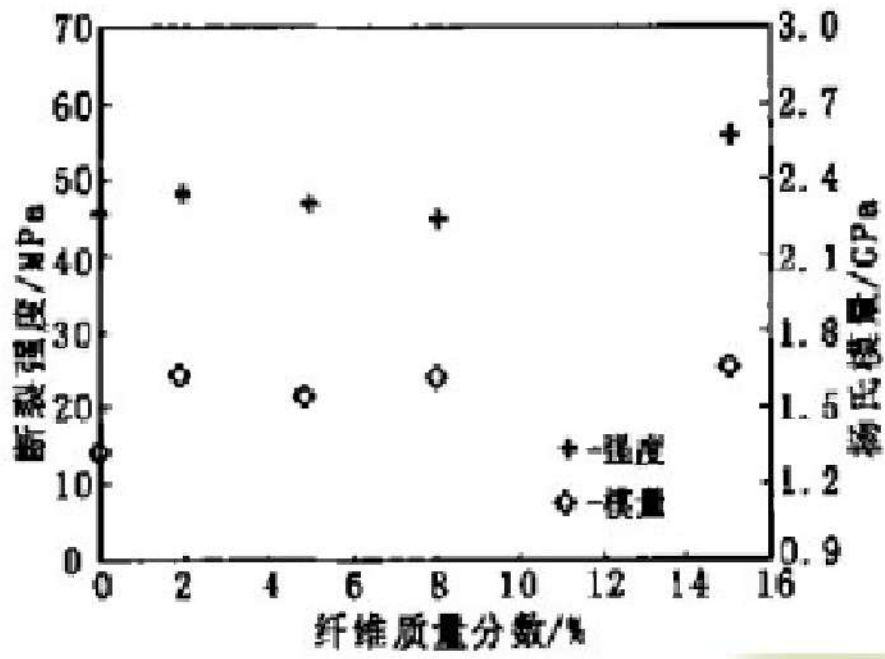
短 C 纤添加量/wt%	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	撕裂强度/ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	邵氏硬度A
0	16.92	807.03	52.99	52
1	11.32	728.67	20.6	53
2	11.99	723.52	18.55	53
3	12.22	721.66	16.13	52



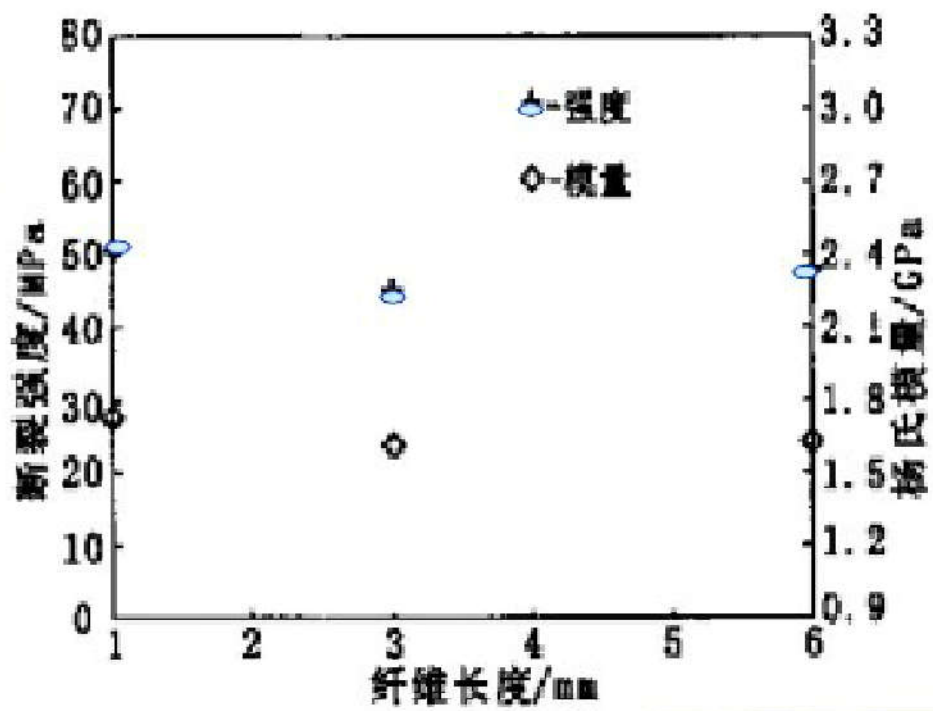
力学性能测试表明，PEN 短纤维的加入提高了复合材料的拉伸强度、模量和断裂强度，而韧性也略有提高。

PEN/PET复合材料样品断面电镜照片

聚萘二甲酸乙二醇酯 (PEN)/聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)



PEN纤维用量对复合材料强度和模量的影响



PEN纤维长度对复合材料强度和模量的影响

- ❖ PEN纤维的加入对 PET树脂的结晶状态没有显著影响，复合材料中 PET以无定型状态存在。
- ❖ 用 PEN短纤维与 PET共混的方法能够在一定程度上提高复合材料的断裂强度与初始模量。
- ❖ 由于复合材料中纤维与基体的粘结性能不够理想，造成复合材料的力学性能随纤维含量和长度的变化规律尚不明显。

三、金属基复合材料增强原理

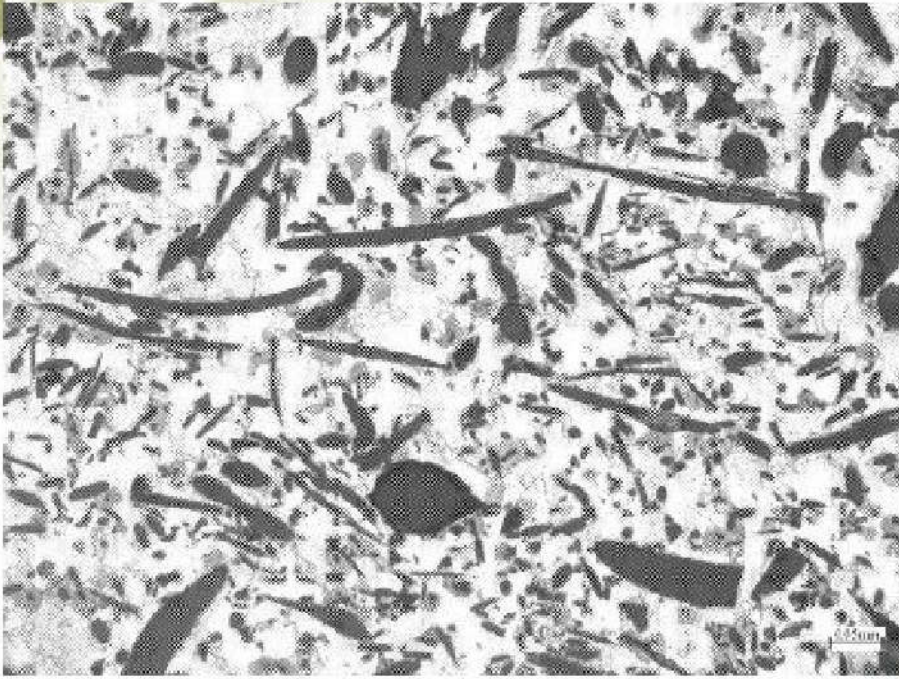
- ❖ 基本特点（塑性基体）
- ❖ 增强规律
- ❖ 遇到的问题

❖ 制备出疏密均匀、有一定强度要求的**硅酸铝短纤维**
预制体；

❖ _____ 料。

❖ _____ 用非常重要，不仅
制体的形状以外，

_____。



多数纤维直径为 5~15 μm , 长度约 30~200 μm 。

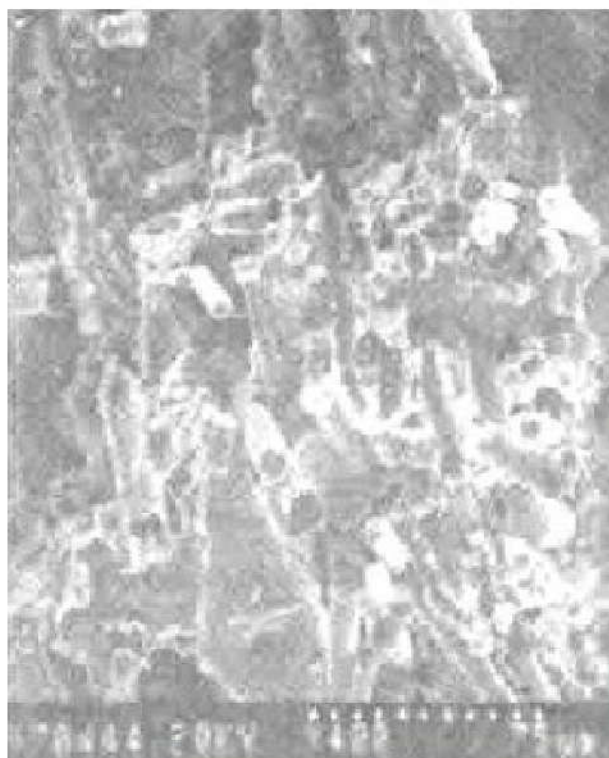
硅酸铝短纤维增强 AZ91D 复合材料微观结构

复合材料的力学性能

Materials	Young's modulus/ GPa	Tensile strength/ MPa	Yield strength/ MPa	Elongation percentage/ %
AZ91D	38.5	201	159	3.0
(Al ₂ O ₃ - SiO ₂) _g /	61.0	238	225	0.8
AZ91D				

复合材料比AZ91D 基体合金的抗拉强度平均提高了约 18 %，弹性模量平均提高了约 58 %。

- ❖ 透射电镜分析表明：复合材料界面上可以发现很多的反应产物，除了几个纳米大小的 MgO 颗粒和尖晶石 MgAl_2O_4 颗粒外，还有为数不少的 MgP_4 颗粒。
- ❖ 另外，在界面上还有尺寸较大的 Mg_2Si 颗粒。
- ❖ 但是，看不出这些界面反应产物之间以及与纤维之间存在共格关系，说明它们之间很可能是以非共格的形式结合的。



氧化铝短纤维增强铝硅复合材料的凝固组织及断口形貌(SEM)

表 1 复合材料室温拉伸性能

Tab.1 Results of tensile tests of composites

基体材料	纤维体积分数, %	抗拉强度/ MPa	伸长率 δ , %
Al-5.5Mg	0	290	13
	8	309	4.8
	15	334	2.4
	20	352	2.0
Al-5.3Cu	0	230	15
	8	240	5.0
	15	266	4.5
	20	275	3.2
ZL109	0	300	2.3
	8	210	0.8
	15	180	0.7
	20	160	0.6

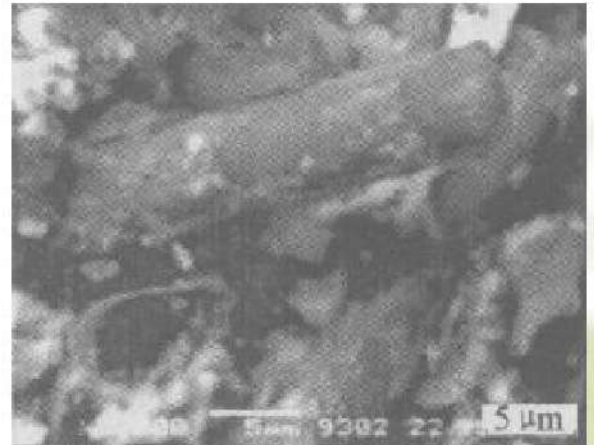
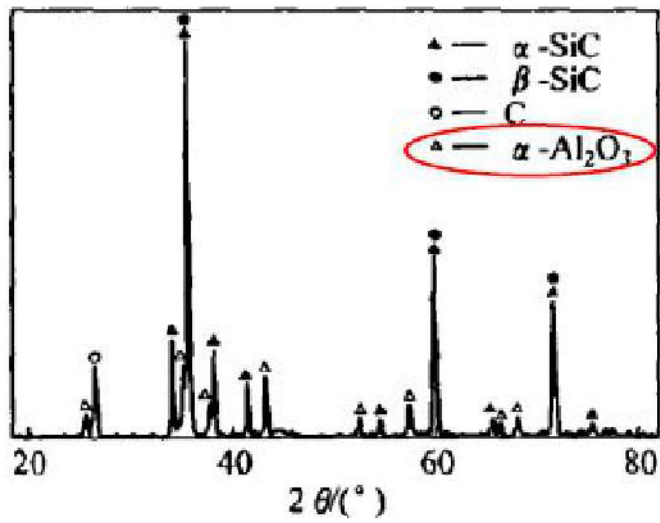
- ❖ 挤压铸造氧化铝短纤维增强铝硅合金复合材料，纤维分布均匀，氧化铝纤维可作为初生硅和共晶硅非自发形核的衬底，细化了复合材料的组织。
- ❖ 在氧化铝短纤维增强铝硅合金复合材料中，存在界面反应。反应程度适当，可增强纤维与基体的结合，有利于提高材料的性能；反应程度不足或过度，则会影响材料的性能。
- ❖ 改进制备工艺，宜从控制界面反应和细化凝固组织着手，以获得性能优良的复合材料。

- ❖ 纤维的排列？
- ❖ 界面结合？
- ❖ 性能匹配？
- ❖ 界面反应？

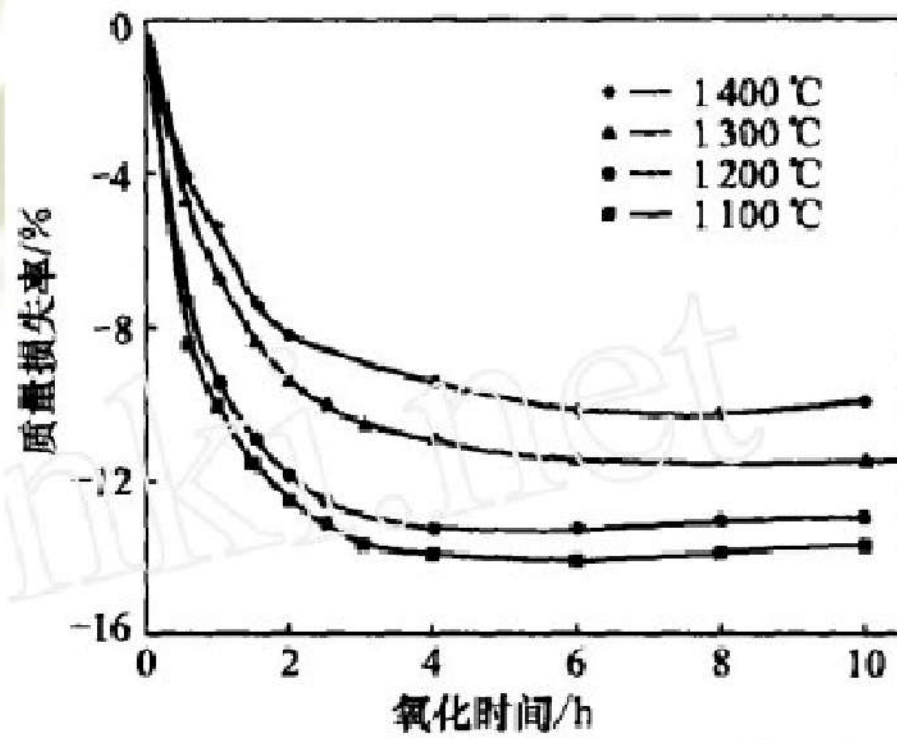
四、陶瓷基复合材料增强原理

- ❖ 基本特点（脆性基体）
- ❖ 增强规律
- ❖ 遇到的问题

Al₂O₃陶瓷罐中混合



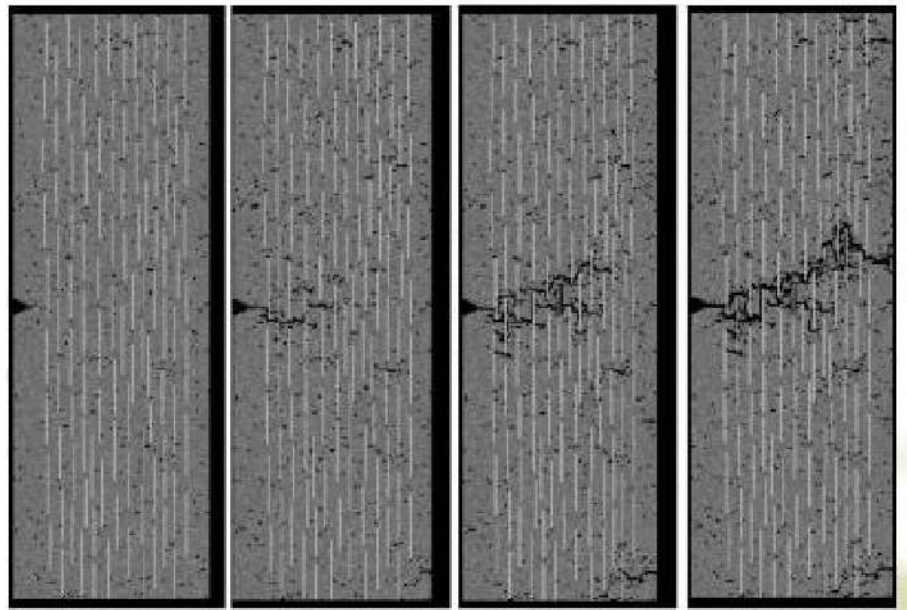
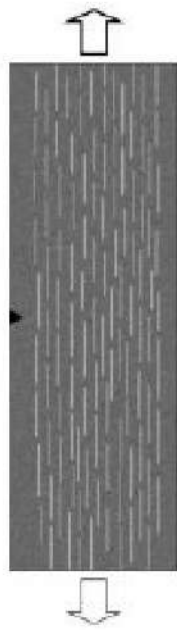
SiC_f/C-SiC复合材料的XRD谱及SEM照片



SiC_f/C-SiC复合材料不同温度下氧化失重率与时间的关系

- ❖ 复合材料的氧化质量损失率随温度的升高而变小，表明温度越高复合材料的抗氧化性能越好。
- ❖ 因为高温使试样表面氧化形成 SiO_2 保护层的速度加快，有利于减少和阻碍氧气对试样中C相的进一步氧化。因而氧化质量损失率减小。

- ❖ 短纤维增强脆性基复合材料以其高性能低成本的特点在工程中得到了广泛的应用。
- ❖ 短纤维对基体裂纹扩展的阻滞作用是提高短纤维复合材料强度和改善材料韧性的一个重要因素。
- ❖ 同时由于短纤维的加入，大大增强了复合材料内部的应力分布的复杂性，增加对短纤维增强脆性基复合材料强度预测和破坏过程分析的难度。
- ❖ 增强短纤维的**长径比**对复合材料的弹性性能、强度、破坏模式都有影响。



48-1子步

79-12子步

100-2子步

130-3子步

短纤维增强复合材料的断裂模拟图

- ❖ 长径比的增加可以提高脆性基体复合材料的峰值强度和刚度，当其达到临界长径比时，强度和刚度不再继续增加；
- ❖ 复合材料的韧性随短纤维长径比的增加而增加；
- ❖ 不同的短纤维长径比，会导致不同的裂纹扩展路径与材料失稳破坏模式。

第二章 复合材料的复合原理及界面

2.1 复合原则

2.2 弥散增强及颗粒增强原理

2.3 单向连续纤维增强原理

2.4 短纤维增强原理

2.5 混杂增强原理

2.6 复合材料界面及其改性

2.7 复合材料界面表征

思考题：

- 1、如何使短纤维有序排列？
- 2、短纤维增强复合材料的优势和不足分别有哪些？
 - 1、排列成预制件、逐层铺设等。
 - 2、成本较低、制备相对容易；不足：纤维分布难以控制，复合材料的界面结合有待加强，相关增强机理有待完善。

2.5 混杂增强原理

- ❖ 一、混杂增强的基本概念
- ❖ 二、不同类型纤维混杂增强
- ❖ 三、短纤维（晶须）+颗粒混杂增强
- ❖ 四、不同类型（尺寸）的颗粒混杂增强

一、混杂增强的基本概念

- ❖ 混杂增强复合材料最早出现于 20 世纪 70 年代初，主要是混杂增强树脂基复合材料。
- ❖ 目的在于保持各组元材料优点的同时，**获得优良的综合性能**，既降低了成本，
- ❖ 混杂增强复合材
特别是可以产生_____料的某些性能，同时也大大降低复合材料的原料费用。

- ❖ **混杂效应**：利用各种不同材料之间的协同增强作用，在不同层次上对基体进行强化、韧化等。
- ❖ 除了各种混杂增强树脂基复合材料外，目前在颗粒混杂增强金属基复合材料、纤维混杂增强水泥基复合材料等方面均开展了比较充分的研究。

❖ 在制备混杂增强复合材料时，最不易解决的就是**增强体**

❖

❖

❖

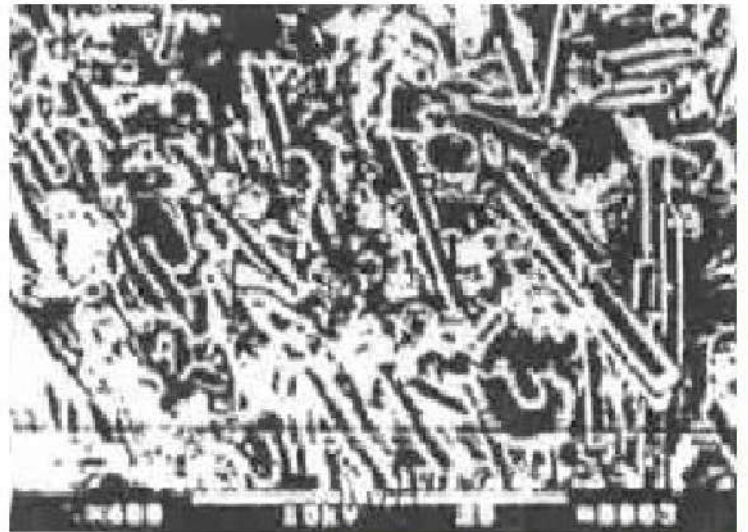
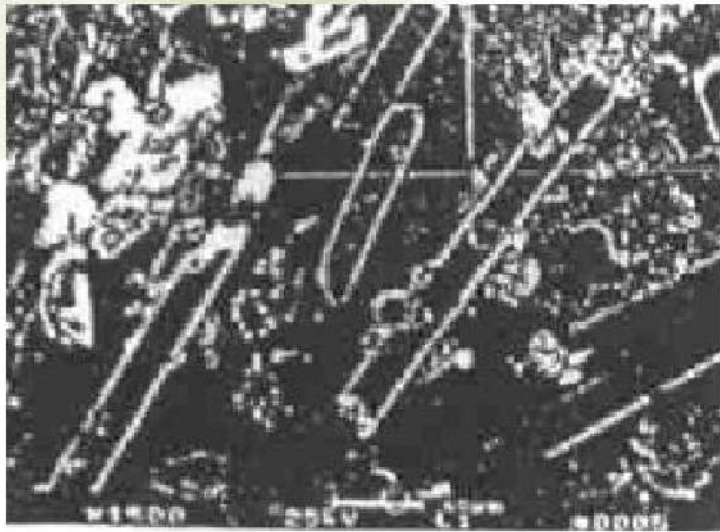
- ❖ 目前制备混杂增强复合材料已取得了一系列研究成果，但仍然属于技术探索和经验积累的起步阶段。
- ❖ 在如何制备成分均匀的混杂增强复合材料、力学模型的建立以及界面研究等很多方面尚有待于进行深入的研究。
- ❖ 虽然混杂增强复合材料在工业上尚未得到广泛的实际应用，但是基于其优异的性能，必将在高科技新材料应用领域占有一席之地。

二、不同类型纤维混杂增强

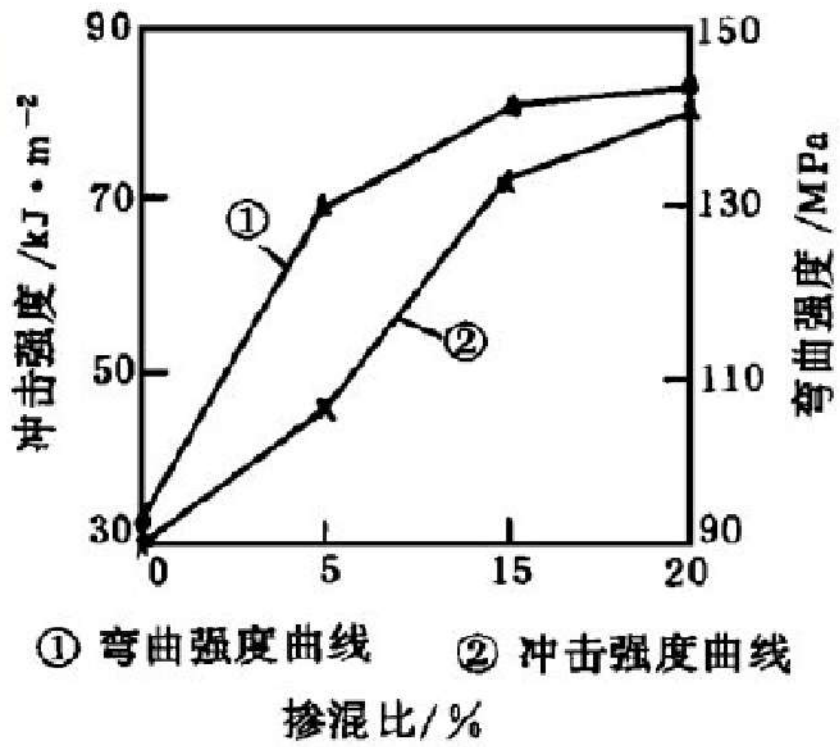
- 1、混杂纤维增强酚醛热固性注塑料
- 2、混杂纤维增强聚丙烯复合材料
- 3、混杂纤维增强环氧树脂复合材料
- 4、混杂钢纤维-聚丙烯纤维增强水泥

1、混杂纤维增强酚醛热固性注塑料

- ❖ 采用混杂纤维对酚醛塑料增强，为兼顾材料耐热性能和力学性能，应考虑与玻纤掺混的纤维应具有高的断裂强度、高模量，并且耐热。
- ❖ 采用有机纤维与玻纤混杂，增强了酚醛热固性注塑料，大幅度地提高了酚醛注塑料的力学性能。
- ❖ 研究表明，混杂纤维更能阻碍裂纹的扩展。



玻纤增强及混杂纤维增强酚醛注塑料断口SEM照片



混杂纤维对酚醛塑料韧性的影响(粒料长 8~10mm)

- ❖ 由于应力集中效应，**微裂纹**一般是在纤维末端起始的，然后在界面上与基体分离。
- ❖ 相邻的微裂纹汇合成连续的裂纹，最后纤维的断裂是由于外部拉应力和相邻纤维通过基体传过来的剪应力共同引起的。
- ❖ 一般来说，离裂纹尖端不远就有纤维断裂。当裂纹尖端达到一个未断裂的纤维时，界面脱胶和纤维拔出是裂纹扩展的主要机理。

2、混杂纤维增强聚丙烯复合材料

- ❖ 采用新的混杂复合工艺，将不同形式的玻璃纤维、剑麻纤维、玻璃纤维毡与黄麻纤维毡用不同的混杂方式(I层内，II夹芯)混杂增强聚丙烯。
- ❖ **天然纤维复合材料**由于其**环保特性**日益受到研究者的关注，但由于天然纤维本身力学性能较低，其复合材料力学性能相比玻璃纤维等合成纤维复合材料有较大的差距，尤其是冲击韧性较低。
- ❖ 将玻璃纤维和黄麻纤维用不同方式混杂增强聚丙烯，并对基体进行改性，可望在保持组分材料优点的同时，获得优良的综合性能。

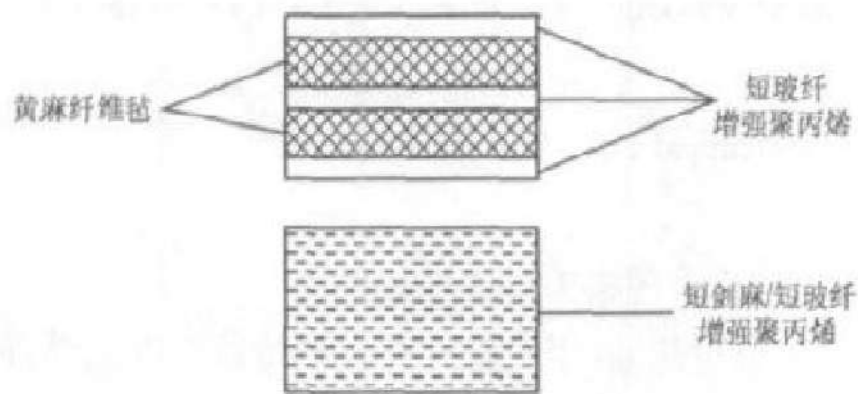


图1 混杂方式 I—层内混杂

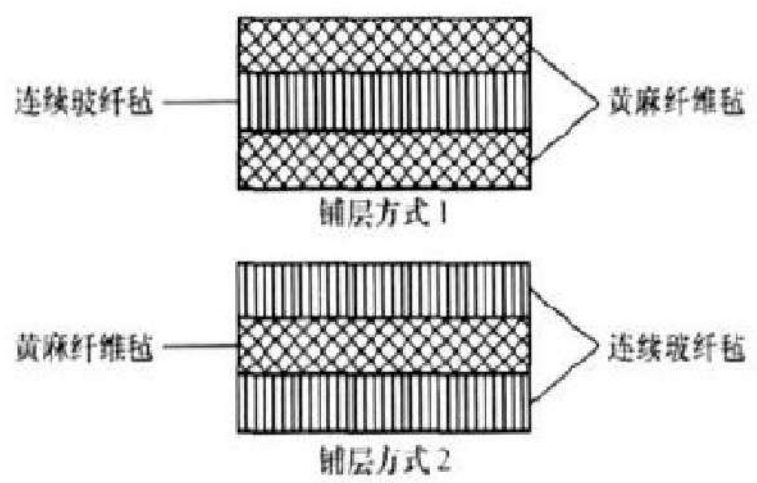
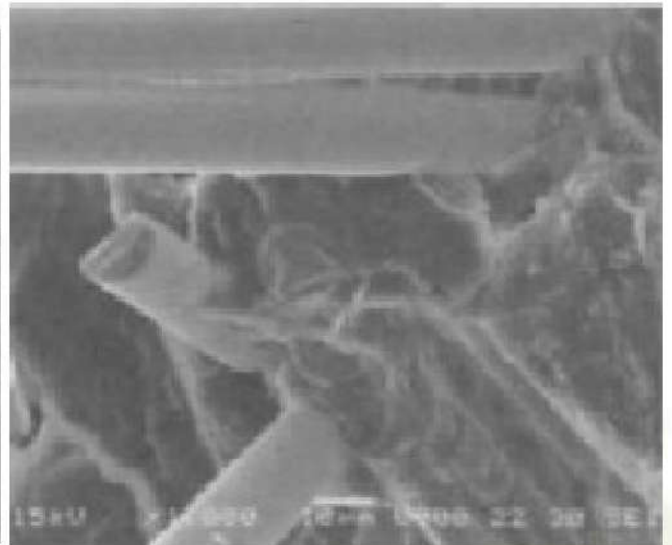
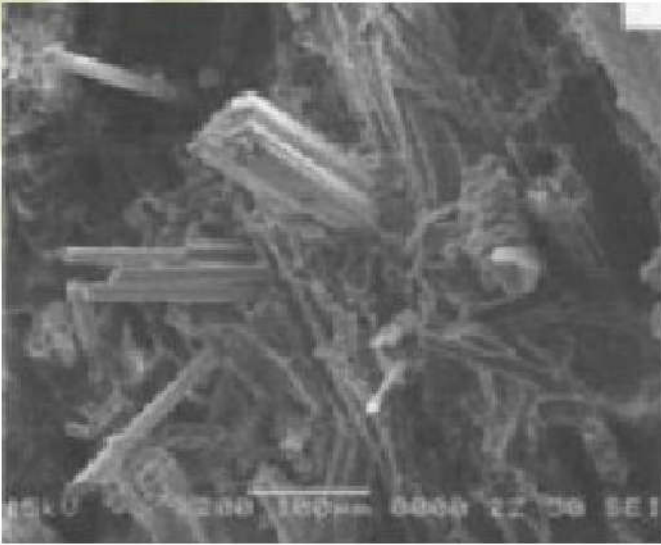


图2 混杂方式 II—夹芯混杂



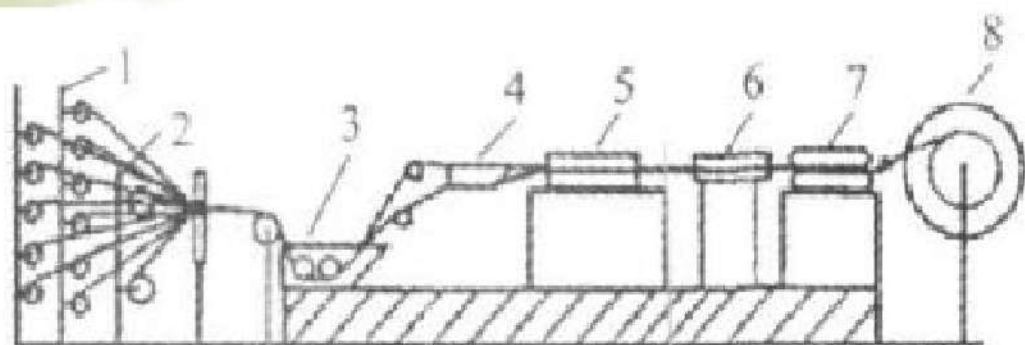
麻纤维毡/短玻璃纤维增强聚丙烯的断面形貌

样品编号	纤维质量分数	基体	混杂方式
A	黄麻毡 38 %	PP	-
B	玻纤毡 32 %	PP	-
C	黄麻毡 17 % 玻纤毡 20 %	PP	Type I
D	黄麻毡 17 % 玻纤毡 21 %	PP + 3 %MPP	Type I
E	黄麻毡 15 % 玻纤毡 17 %	PP + 20 %CaCO ₃	Type I
F	黄麻毡 15 % 玻纤毡 18 %	PP	Type II
G	黄麻毡 13 % 玻纤毡 17 %	PP + 3 %MPP	Type II
H	黄麻毡 13 % 玻纤毡 16 %	PP + 20 %CaCO ₃	Type II

样品编号	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /MPa	拉伸强度 /MPa	杨氏模量 /MPa	冲击强度 / J m ⁻¹
A	35.13	2 113	28.42	2 598	65.0
B	97.7	2 904	81.1	3 564	511.2
C	84.94	3 564	52.81	4 358	423.3
D	90.41	4 177	64.82	4 913	287.0
E	84.97	4 374	45.07	3 798	460.3
F	72.29	4 160	43.12	3 542	468.8
G	115.1	6 283	57.43	4 528	208.1
H	106.9	5 295	42.92	4 035	476.1

3、混杂纤维增强环氧树脂复合材料

- ❖ 复合材料线芯铝绞线是对普通钢芯铝绞线进行的一场根本性的变化。
- ❖ 采用拉挤工艺制备了一种碳/玻璃混杂纤维增强环氧树脂复合线芯。
- ❖ 复合材料线芯的密度仅为 1.76 g/cm^3 ，抗弯强度大于 1600 MPa ，抗拉强度大于 2000 MPa 。



1. 纱架 2. 毡板 3. 浸胶装置 4. 预成型模具 5. 加热板
6. 后加热板 7. 牵引机 8. 卷绕装置

图 1 拉挤工艺流程



图 环氧树脂复合线芯照片

- ❖ 随着温度范围的增大，复合材料线芯的线膨胀系数逐渐减小，当温度高达310 °C 时，线膨胀系数为零。
- ❖ 这主要是因为碳纤维的线膨胀系数为负值，而且在复合材料中碳纤维的体积分数(45%)和模量(230GPa)等都占有主导地位。
- ❖ 整个复合材料线芯在纵轴方向的长度随温度的升高而缩短。

4、混杂钢纤维-聚丙烯纤维增强水泥

- ❖ 混杂纤维增强混凝土具有优异的力学性能和耐久性，研究较多的是碳纤维-聚丙烯纤维混杂、碳纤维-钢纤维混杂、碳纤维-尼龙纤维混杂和钢纤维-聚丙烯纤维混杂。
- ❖ 纤维对混凝土的增强、增韧效应可见，混杂纤维增强混凝土已成为当前新兴的研究领域。

- ❖ 钢纤维增强是提高水泥砂浆韧性的一项有效措施，目前多数研究工作都采用单一尺寸钢纤维作增强材料。
- ❖ 由于水泥基材料(水泥净浆、水泥砂浆、混凝土)具有多层次性特征，因此宜掺入不同尺寸的钢纤维与基体各结构层次相匹配，以达到从整体上优化其力学性能的目的。
- ❖ 混杂钢纤维增强水泥砂浆是在优化的基体中掺入不同尺寸的钢纤维，以利用各种不同尺寸钢纤维之间的协同增强作用，在不同层次上对基体进行强化、韧化。

- ❖ 2种不同直径钢纤维在水泥砂浆受荷破坏过程中起着不同的作用。
- ❖ 在基体初裂阶段，微细钢纤维在基体中的间距更小，对微裂缝的桥接作用更大，因此相应提高了水泥砂浆的断裂能。
- ❖ 随着荷载的增加，微裂缝逐渐聚合成局部裂缝，而微细钢纤维因长度较短，对局部裂缝的桥接作用就不如中等直径钢纤维。
- ❖ 荷载继续增加，中等直径钢纤维与基体脱粘并逐渐被拔出，消耗了较多的能量，从而显著提高了水泥砂浆的韧性。
- ❖ 在整个破坏过程中不同直径的钢纤维作用互补，对于水泥砂浆的韧性存在协同效应。

- ❖ 不同直径钢纤维的混杂对于水泥砂浆抗折强度的提高具有明显的混杂效应。
- ❖ 在钢纤维体积分数一定的情况下，混杂钢纤维对水泥砂浆力学性能的改善作用可优于单一直径钢纤维。

- ❖ 钢纤维的弹性模量高，价格较聚丙烯纤维高，但较碳纤维低。
- ❖ 与素混凝土相比，钢纤维对混凝土的抗压强度并无明显促进作用，甚至还有所降低。
- ❖ 钢纤维密度大、造价较高、搅拌困难而不易于分散，有生锈问题，对于火灾引起的爆裂几乎无效等，这些问题影响了其在建筑工程中的应用。

- ❖ 聚丙烯纤维属于合成纤维，它的价格最低，弹性模量低、变形大。
- ❖ 聚丙烯纤维混凝土的研究在国外还是近20年的事，在我国则是近10年的事。
- ❖ 聚丙烯纤维对混凝土的强度影响不明显，但可显著提高混凝土的韧性、抗冲击性能、阻裂性和高耐久性，延缓钢筋锈蚀和抗热爆性能等与韧性有关的物理性能。
- ❖ 主要应用于抗裂要求高、耐久性要求好和要求非磁性增强材料的一些场合，如地下室、水利工程、港口工程等等。

聚丙烯纤维物理力学性能指标

直径/ μm	长径比	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	伸长率/%	断裂应变 G/D	弹性模量/GPa	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
10~12	1 500	165~173	1.5~2.0	5.5~7.5	3.5	0.91

注：为提高纤维与水泥砂浆的粘结力，已对纤维表面作适当的处理

混凝土配合比

混凝土 类型	水胶比	用水量 $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	砂率 /%	F 掺量 /%	FDN 掺量 /%	纤维掺量 (P/S%)
P	0.31	170	35	15	1.0	0
PP	0.31	170	35	15	1.0	0.30
SP	0.31	170	35	15	1.0	0.60
SPP	0.31	170	35	15	1.0	0.30/0.60

混凝土配合比（聚丙烯/钢混杂增强）

混凝土类型	水胶比	用水量 / (kg m ⁻³)	砂率 / %	F 掺量 / %	FDN 掺量 / %	纤维掺量 (P/ S%)
P	0.31	170	35	15	1.0	0
PP	0.31	170	35	15	1.0	0.30
SP	0.31	170	35	15	1.0	0.60
SPP	0.31	170	35	15	1.0	0.30/0.60

F掺量：硅粉掺量，掺量在5%~15%，比较经济。

_____：高效减水剂掺量，为水泥重量的0.5~1.5%。

高性能混凝土的力学性能

混凝土类型	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa	劈拉强度 /MPa	拉压比 / %
P	54.4	6.0	5.2	9.5
PP	56.3	6.4	5.6	10.0
SP	58.8	7.3	5.8	9.6
SPP	60.1	7.5	6.1	10.4

- ❖ 混杂纤维混凝土具有良好的抗冻性、抗渗性、抗硫酸盐侵蚀和抵抗水浸泡对抗弯强度影响的能力。
- ❖ 混杂纤维增强水泥基复合材料抗弯强度均明显高于素混凝土。
- ❖ 该类复合材料把具有不同性能和优点的纤维混杂，相互取长补短，在不同层次和受荷阶段发挥“正混杂效应”来增强混凝土。

三、短纤维（晶须）+颗粒混杂增强

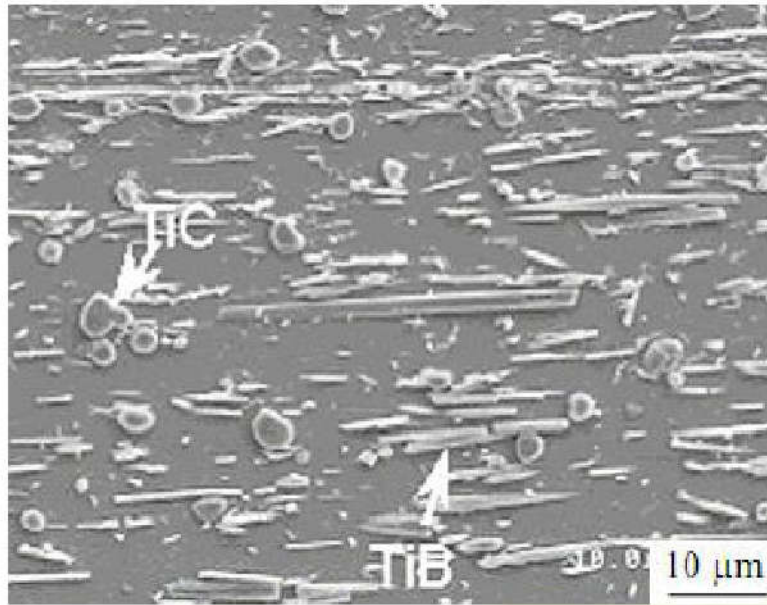
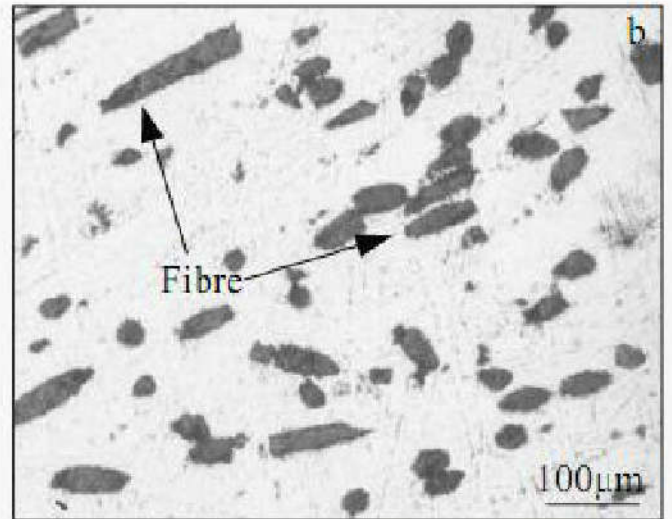
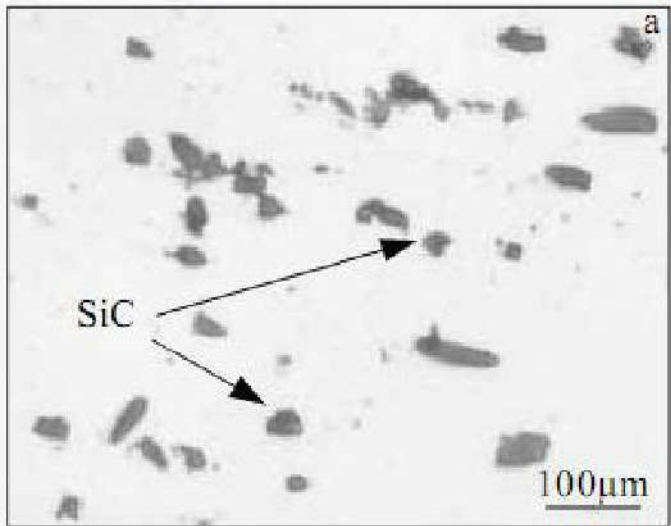


图 1 热压法制备的TiC+TiB/Ti复合材料组织

- ❖ TiC、TiB 混杂增强钛基复合材料的研究处在初级阶段，制备方法主要有原位热压法、熔铸法、自蔓延燃烧合成+熔铸技术。
- ❖ 混杂效应将明显提高或改善单一增强材料的某些性能，从而扩大材料设计的自由度。
- ❖ 进一步探索反应体系和工艺，使增强体的界面及形态最优化，获得最佳的力学性能。

Al₂O₃ 短纤维和 SiC 颗粒增强铝基复合材料

- ❖ 复合材料的增强体为 Al₂O₃ 短纤维和 SiC 颗粒，颗粒尺寸为 20μm。
- ❖ Al₂O₃ 短纤维和 SiC 颗粒的体积分数分别为 10 % 和 20 %，总体积分数为 30 %。
- ❖ 复合材料较易形成致密均匀的转移膜，在制动过程中能保证有较稳定的摩擦系数，且对材料的磨损有抑制作用。



混杂增强镁基复合材料的金相组织

表 1 纯镁及其复合材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of pure magnesium and its composites

Samples	σ_b /MPa	δ /%
Pure Mg	98.0	16.00
(SiC _p +Al ₂ O ₃ ·SiO _{2f}) 8%/Mg	210.2	2.13
(SiC _p +Al ₂ O ₃ ·SiO _{2f}) 18%/Mg	267.8	0.64

- ❖ 增强相的引入改善了纯镁的强度但降低了其塑性。与纯镁相比，含有 8%和 18%增强相的复合材料的拉伸强度分别提高了近 110%和 170%。
- ❖ 镁基复合材料的阻尼性能远低于纯镁，位错阻尼和界面阻尼是纯镁及其复合材料中主要的阻尼机制。

四、不同类型（尺寸）的颗粒混杂增强

- ❖ SiC 颗粒增强铝基复合材料兼有高热导率、低热膨胀系数、低密度、高比强度和高比模量等优点，在电子封装、航空航天、光学仪器等领域具有广阔的应用前景。
- ❖ TiB₂颗粒在铝合金熔体中具有良好的悬浮稳定性，在 TiB₂+SiC 混杂颗粒增强铝基复合材料中，由于 TiB₂颗粒的存在，有效抑制了 SiC 颗粒的沉降行为。

表1 ZL109合金基体成分

Si	Cu	Ni	Mg	Al
12.0	1.2	1.0	1.0	Bal.

将 ZL109 合金在电阻炉中熔化，当熔体温度上升到 850 °C 后，再将按 Ti 与 B 摩尔比 1:2 比例混合的 K_2TiF_6 和 KBF_4 合成反应盐加入到高温合金熔体中，同时加入少量 Na_3AlF_6 和 Sb 作为反应助剂和变质剂，用搅拌机以 600 r/min 的速度搅拌 15~20 min 以促进反应充分完成，制备出 16% TiB_2 /ZL109 复合材料。

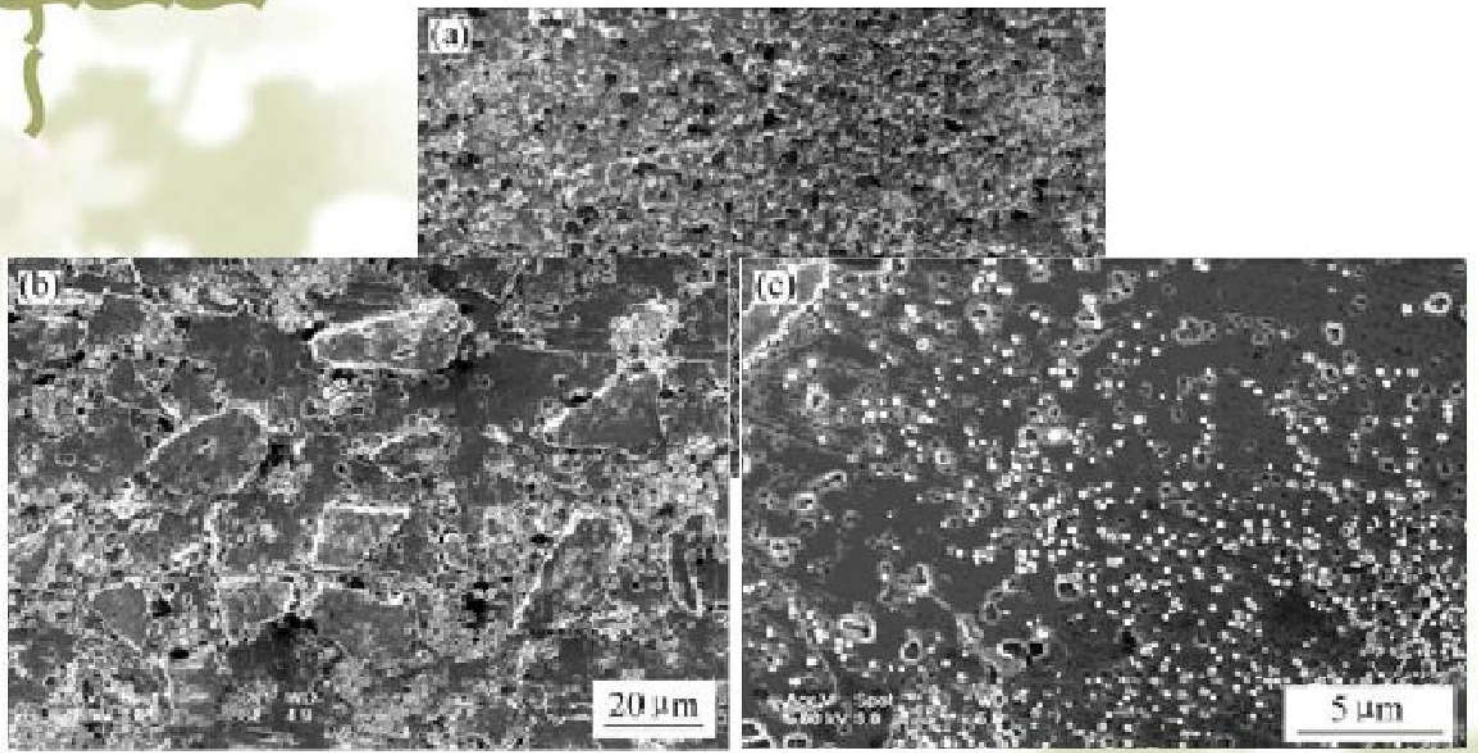


图 (TiB₂+SiC)/ZL109复合材料组织(SEM)

复合材料的力学性能

Material	σ_b /MPa	E /GPa	δ /%
10%SiC/ZL109	270.5	81.4	0.19
10%TiB ₂ /ZL109	337.2	83.9	0.67
(10%TiB ₂ +10%SiC)/ZL109	275.6	105.8	0.12

Material	E /GPa		
	Measured	Calculated	Error/%
10%SiC/ZL109	81.4	81.3	0.12
10%TiB ₂ /ZL109	83.9	79	5.84
(10%TiB ₂ +10%SiC)/ZL109	105.8	90.3	14.7

Elastic module of ZL109, SiC and TiB₂ are 71 GPa, 435 GPa and 550 GPa, Volume fractions of SiC and TiB₂ are 8.6% and 6.2%.



颗粒混杂增强铝基复合材料的制备方法

- ❖ 在铜合金中加入石墨颗粒可以降低复合材料和偶件 GCr15 钢的磨损率，获得低而稳定的摩擦系数。
- ❖ 有效防止高温条件下严重粘着转移现象的发生，使得在 400℃ 下混杂复合材料仍具有较低的磨损率。
- ❖ 通过“磨屑机械混合→热压”的机制形成一个连续富石墨机械混合层，起到良好的固体润滑作用，使 (SiC+Gr)/Cu 复合材料具有良好摩擦磨损特性。

GCr15钢为对磨材料时摩擦副的高温摩擦系数

$T/^\circ\text{C}$	Friction coefficient μ	
	SiC / Cu	(SiC + Gr) / Cu
250	0.69	0.28
350	0.74	0.32
400	0.77	0.35

- ❖ 无论是用固态法还是液态法，在制备混杂增强复合材料时，最不易解决的就是增强体均匀分布的问题。
- ❖ 可以使用适当的有机溶剂和分散剂，以改善增强体表面的润湿性。
- ❖ 增强体组成和成分的复杂导致复合材料的结构复杂化，以往建立的很多模型不能很好地描述混杂增强复合材料的力学行为。
- ❖ 界面结构对复合材料性能有很大的影响，追求最佳的界面结合已成为复合材料研究者研究的目标之一。

第二章 复合材料的复合原理及界面

2.1 复合原则

2.2 弥散增强及颗粒增强原理

2.3 单向连续纤维增强原理

2.4 短纤维增强原理

2.5 混杂增强原理

2.6 复合材料界面及其改性

2.7 复合材料界面表征

思考题：

- 1、混杂增强希望达到的目的是什么？试举例分析。
- 2、试分析长纤维与颗粒混杂增强的优势和不足。
 - 1、充分利用不同增强体的性能优势，获得比单一复合更加优异的综合性能。
 - 2、优势：获得良好单向性能的同时，获得良好的基体性能。
不足：长纤维的制备成本高，颗粒增强使成型难度更大。

谢谢大家！