

# 第六章 复合材料

为什么主要成分为碳酸钙的贝壳强度要比同样组成为碳酸钙的粉笔要高很多？

- 复合材料的概述
- 复合材料的复合理论
- 几种常见的复合材料
- 复合材料的成型方法
- 复合材料的发展趋势

# 复合材料的定义

复合材料是由两种或两种以上物理和化学性能不同的物质组合而成的一种多相固体材料。(ISO定义)

材料A + 材料B ( + ..... )  $\longrightarrow$  材料C

基体  
Matrix

+

增强体  
Reinforce-  
ment

主要组份

粘结、保护增强相并  
把外加载荷造成的应力  
传递到增强相上去

其它组份

主要承载相，并起着  
提高强度(或韧性)的  
作用

改善或克服单一组成材料的弱点，创造单一材料不具备的  
双重或多重功能。

## 复合材料的特点

- ✓多相：至少两相；
- ✓独立性：相是独立的，组成和性能独立；
- ✓复合效益：具备不同于组成相的独特的性能或是效益； \*\*\*\*\*
- ✓固相：复合产物为固相；
- ✓可设计性：组成和性能具有可设计性。 \*\*\*\*\*

悬浮液、气溶胶、雾等含有气相或是液相的多相体系不能称之为复合材料。

## 复合的目的

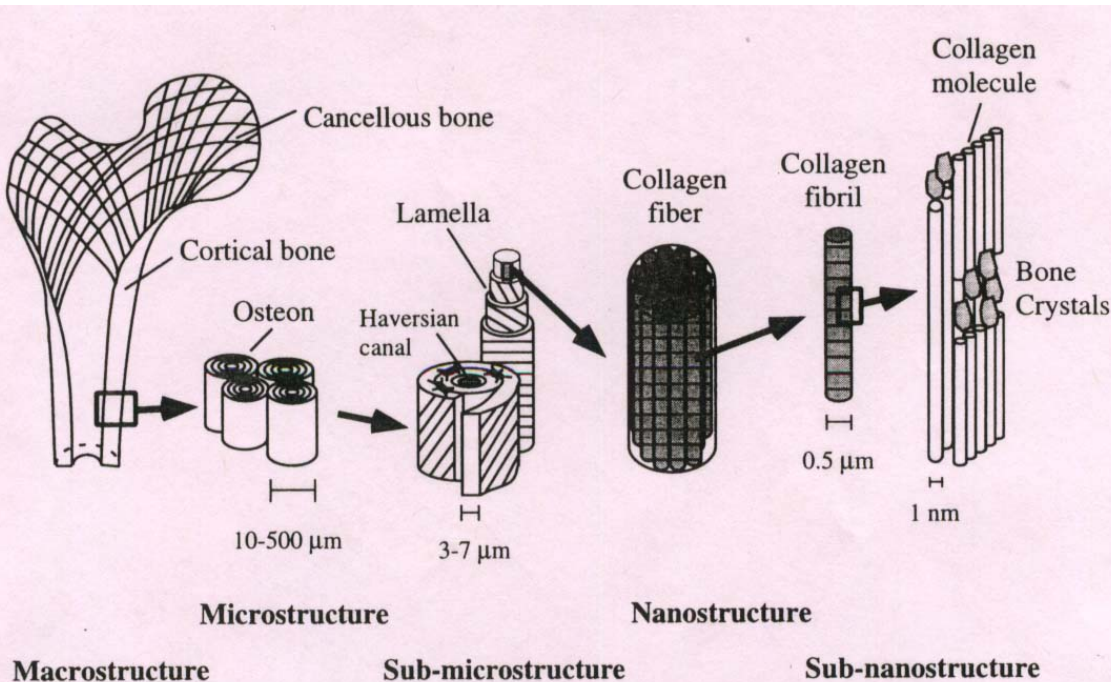
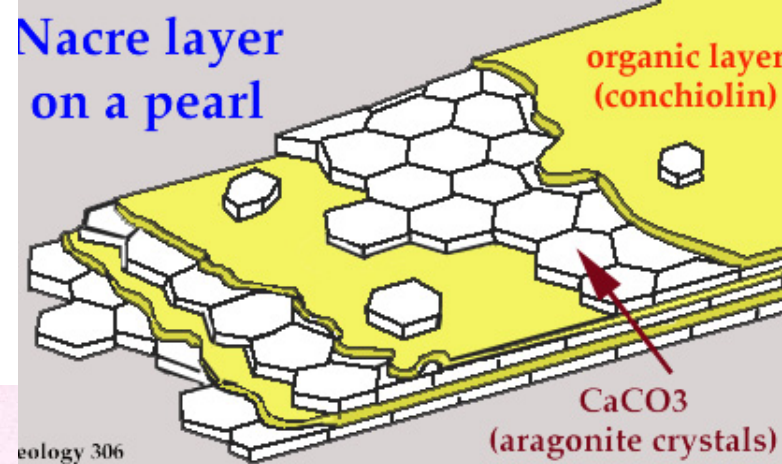
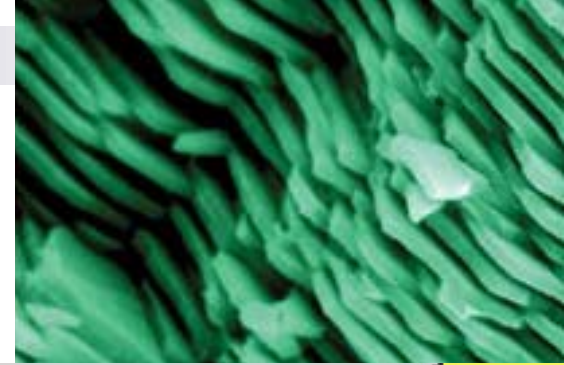
- ✓ 获得新组成的材料;
- ✓ 获得新形态的材料;
- ✓ 获得单一组分不具备的性质和功能, 获得复合效应;
- ✓ 获得某种特定的性能或效益。碳酸钙填充PVC, PP等聚合物时只是为了经济效益与其功能无关。

# 几个实例

复合材料 = 增强材料 + 基体

骨 = 胶原质 + 磷灰石

贝壳 = 碳酸钙 + 基质胶原





# Aluminium or composite?

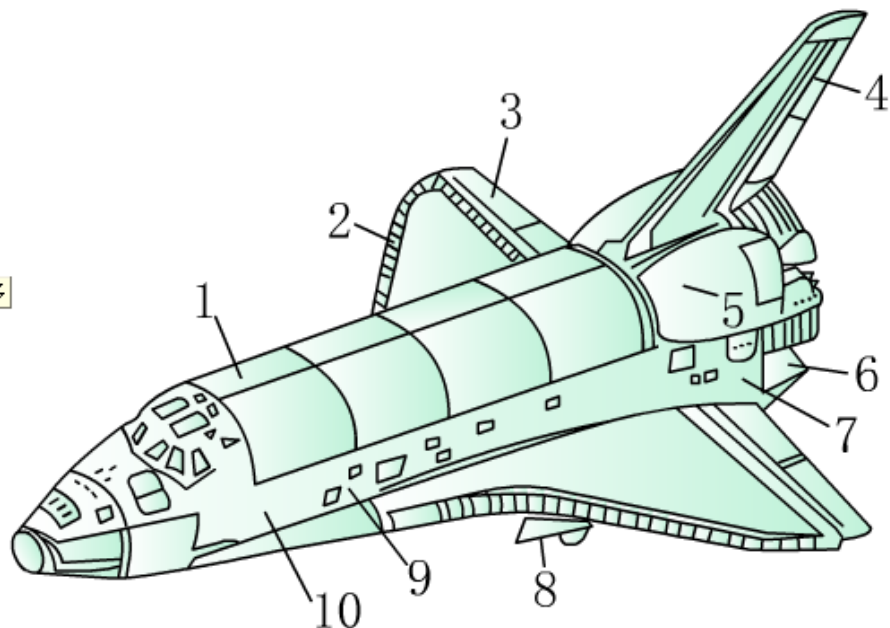


波音787：以碳纤维合成  
物为主体材料耗油量：  
减少20%左右。



# 航空航天

右键功能更多



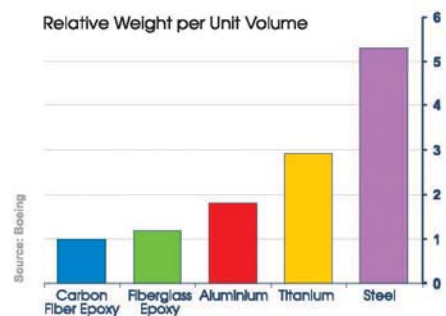
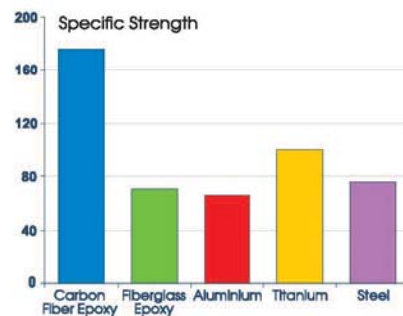
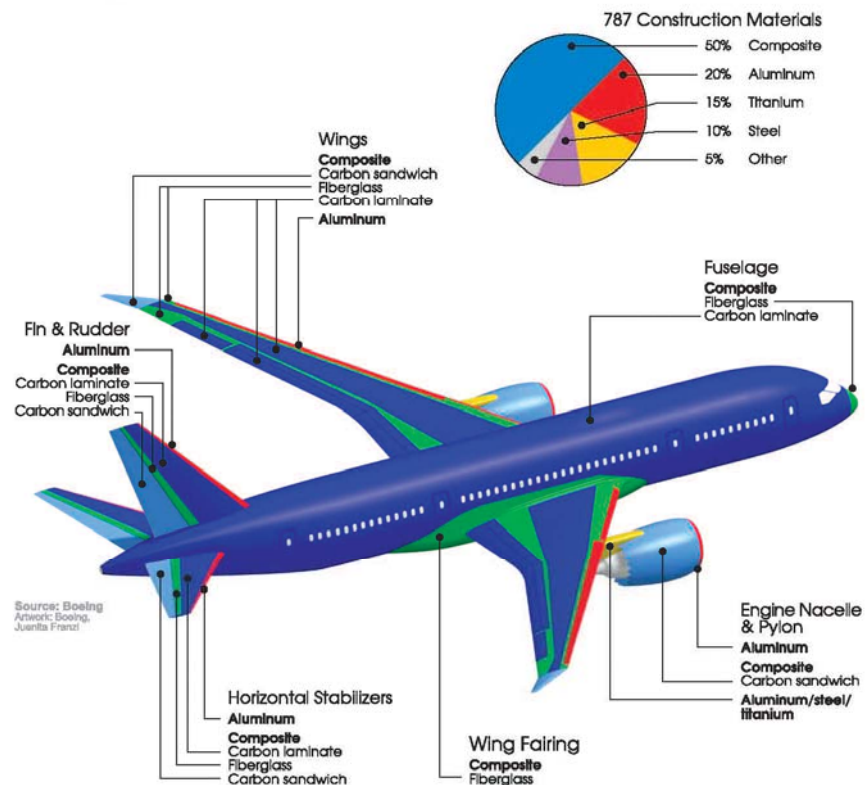
NASA在航天飞机上采用复合材料之后重量减轻的效果

使用部位	复合材料	重量减轻
1>行李舱门	碳/ 环氧	408
2>翼前缘热屏蔽	碳/ 碳	437
3>升降副翼	碳/ 聚酰亚胺	481
4>垂直尾翼	碳/ 聚酰亚胺	397
5>OMS吊舱	碳/ 环氧	150
6>后部机身	碳/ 聚酰亚胺	216
7>后部机身	碳/ 环氧增强钛	317
8>起落架门	碳/ 聚酰亚胺	122
9>中央机身支柱（内部）	硼/ 铝	145
10>压力容器（内部）	凯芙拉/ 环氧	199
总计重量减轻		2872



# 波音787型飞机中使用的复合材料

## Composite Materials

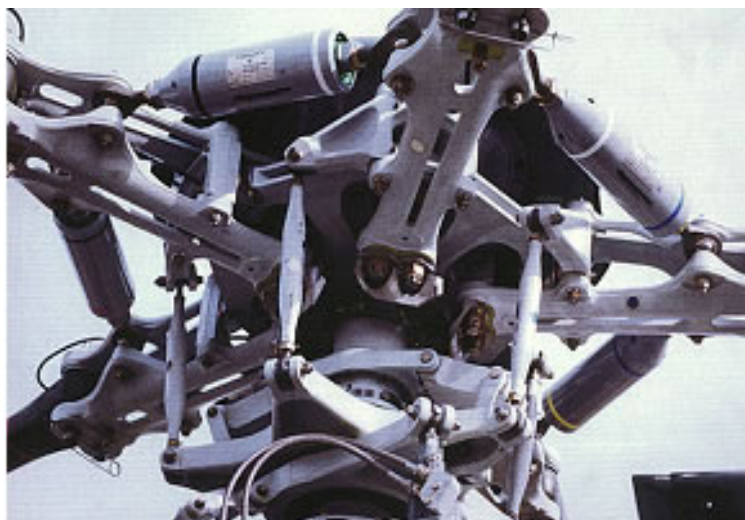


## 材料概论

# 军事



复合材料垂直安定面（左上图中黑色部分）  
复合材料前机身段（上图中黑色部分）  
复合材料在国产军用飞机中的应用（左图）



金属基复合材料在直升飞机  
中的应用（用作旋翼支架）



## 材料概论

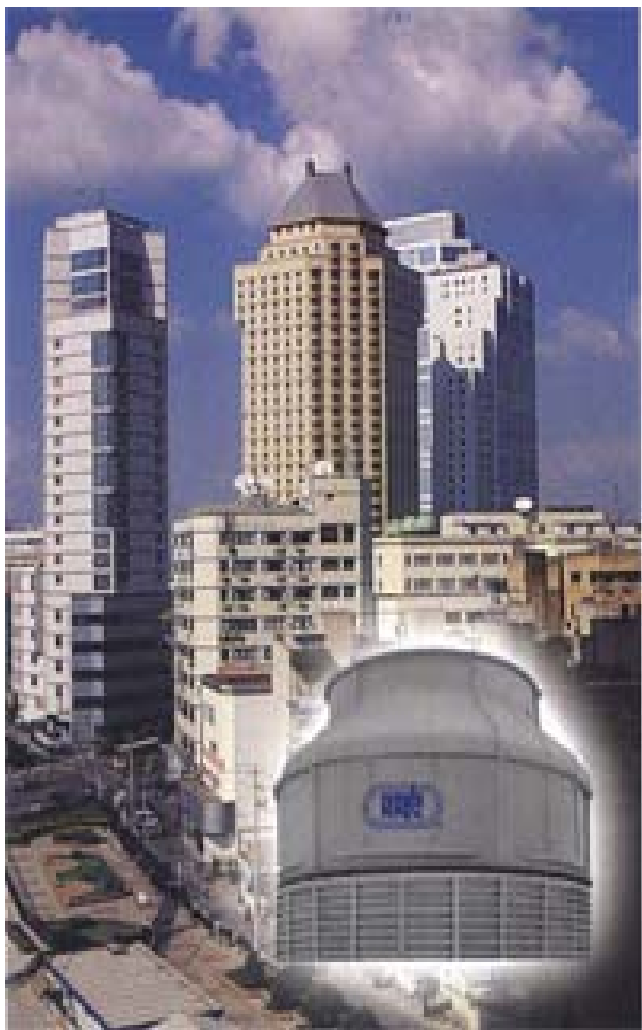
# 交通



## 材料概论



# 建筑



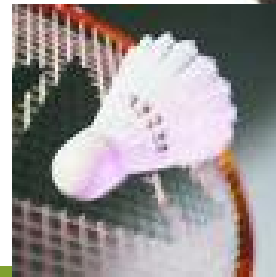
## 材料概论



# 日用品



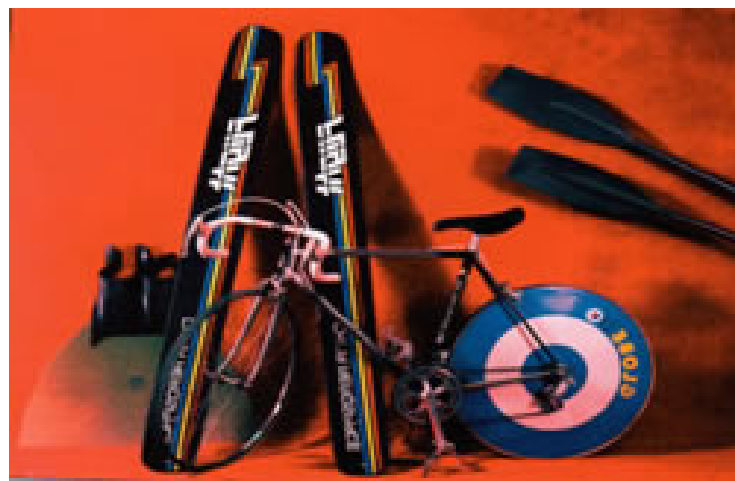
## 体育用品



## 材料概论



## 玻璃钢应用于体育用品





From the Collections of The Henry Ford

Image ID#: P.189.16351

Robert Boyer and Henry Ford with the Soybean Car.

<http://www.hfmgv.org/research/services/populartopics/SoybeanCar/>

Ford's 'soybean car' used cellulose fibre/soybean resin composite panels attached to a tubular steel frame. Kerb weight was reduced from 3000 to 2000 lb (900 kg).

安装在某边防部队的两台10KW风力发电机并联机组

风力发电机叶片  
用复合材料

- 现代复合材料的起源：发端于20世纪50~60年代，主要是适应航空航天技术对高强度低密度材料的需求。
- 复合材料的现状：2005年全球玻璃钢/复合材料产量逾700万吨，产值逾4千亿元人民币。我国的产量约为全球的1/4，而平均单价却仅为世界平均价格的1/4（低于1.5万人民币/吨）我国是世界玻纤产品的第二大生产国。
- 我国玻纤著名研究院所：南京玻璃纤维研究院、北京玻璃钢研究院。
- 我国玻纤工业“三强”：泰山玻璃纤维股份有限公司、巨石集团有限公司（亚洲玻纤3强，世界玻纤5强）、重庆国际复合材料有限公司



## 复合材料

### 按基体相分

- 金属基 界面结合存在问题;
- 陶瓷基 对增强体有特殊要求, 如耐高温等;
- 聚合物基 热塑性、热固性聚合物。可成型性能好;
- 水泥基 界面结合好, 成型时基体有化学反应。

### 按增强相的形态分

- 颗粒增强
  - 碳纤维
- 纤维增强
  - 玻璃纤维
  - 有机纤维
- 晶须增强
  - 复合纤维
- 编织物增强

### 按用途分

- 结构复合材料 承受载荷, 作为承力结构使用
- 功能复合材料 电、磁、光、热、声、摩擦、阻尼、化学分离性能

# 复合材料的原料(增强体)

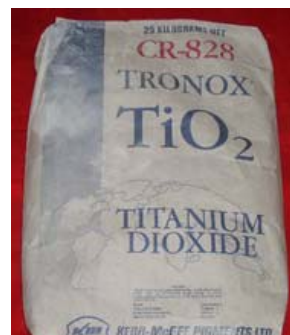
## ■ 粉状填料:

碳酸钙、二氧化钛、蒙脱土、碳黑、二氧化硅(白碳黑)。特点是用量大、价格低。



## ■ 纤维增强体:

碳纤维、硼纤维、芳纶纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维以及碳化硅晶须、氧化铝晶须等。特点是用量少、强度大、价格高。

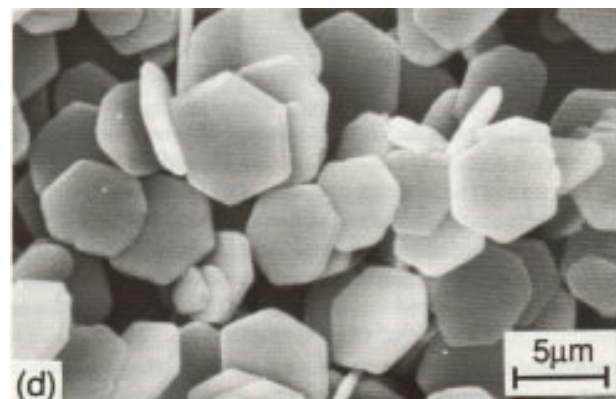
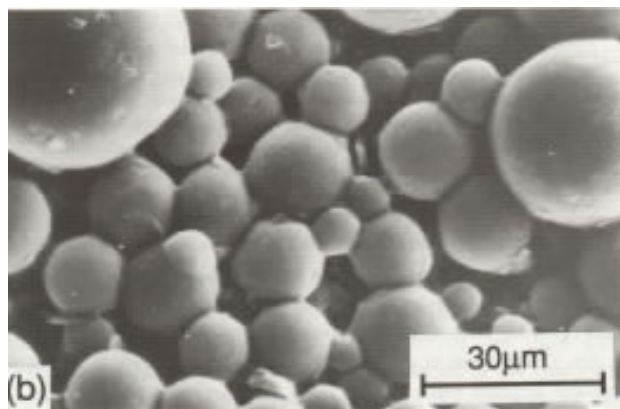
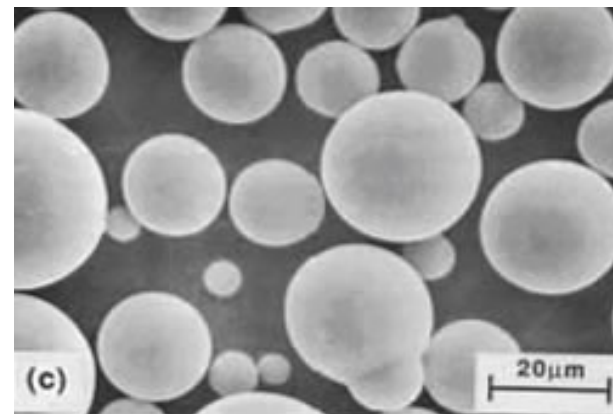
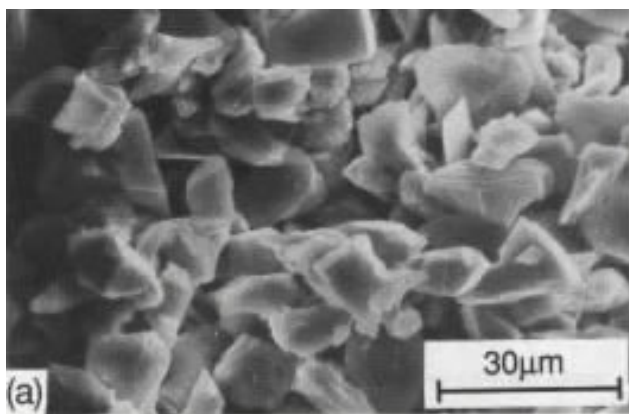


## ■ 编织物:

二维纺织布、三维纺织物等。特点是初期可赋形、强度大、价格高。



纤维与晶须的主要特点是: 密度低、强度高、弹性模量高、线膨胀系数小。



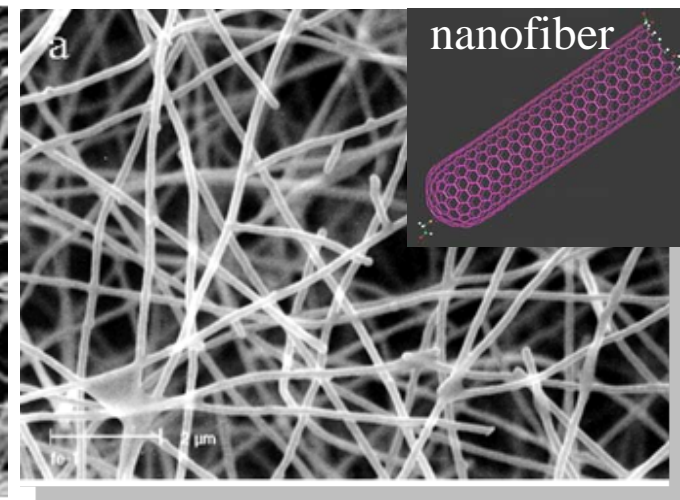
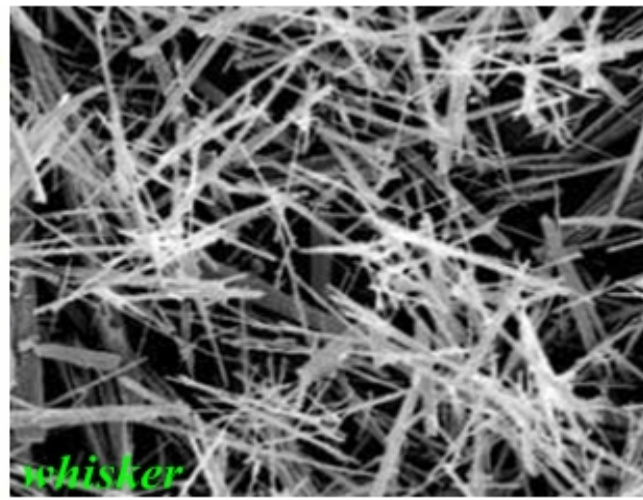
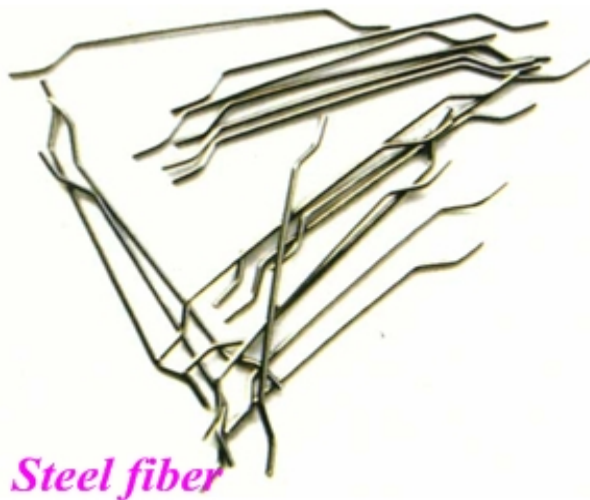
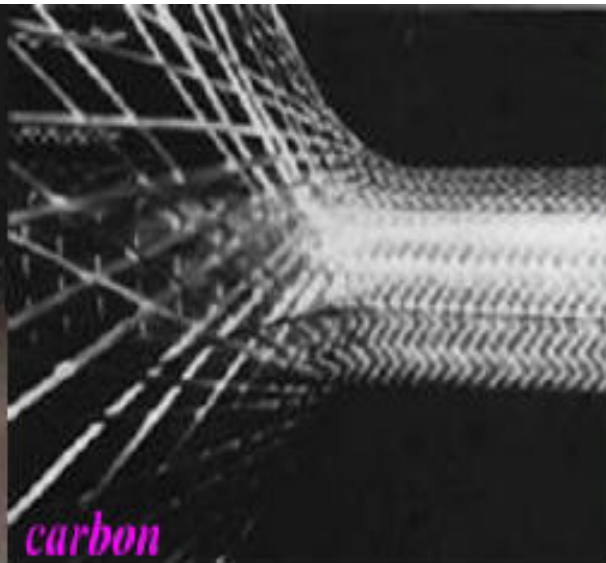
a) 多角状SiC颗粒

c) 溶胶凝胶法制备的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒

b) 等离子喷射熔融法制备的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒

d) α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>片晶

# 几种纤维增强体

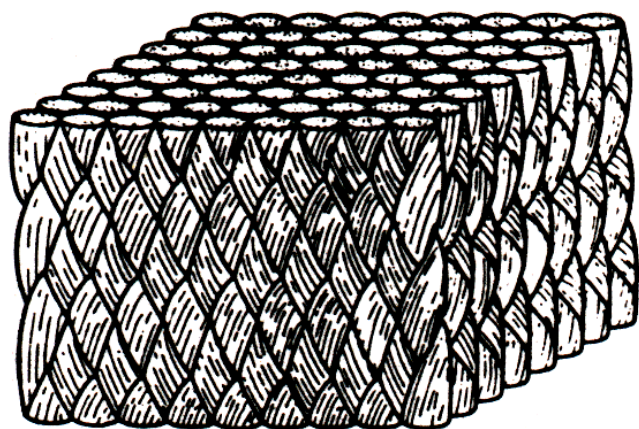


# 纤维的强度

材料名称	抗拉强度(MPa)
玻璃	40~120
玻璃纤维	1500~5000
棉纤维	400~600
羊毛	150~200
丝	350~450
腊纶纤维	300~600
聚酰胺纤维	500~700
芳纶 1414	2800
软钢	380~480
钢丝	4200
铜棒	250
细铜丝	400
铝材	70~400
$\text{Al}_2\text{O}_3$	260
$\text{Al}_2\text{O}_3$ 纤维	1000~2600
$\text{Al}_2\text{O}_3$ 单晶纤维	14000~28000
硼纤维	3000~5000
碳纤维	2000~7000
非晶合金纤维	3000

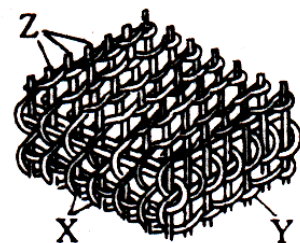
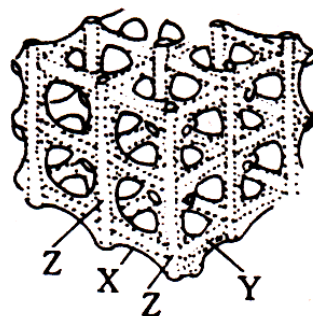
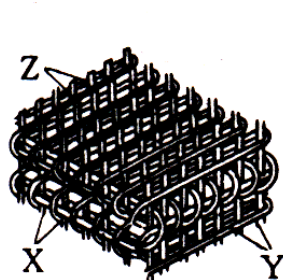


## 三维编织纤维结构

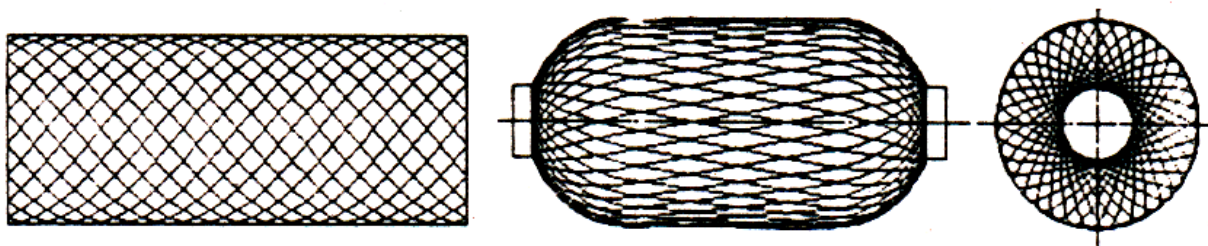


## 三维正交非织造的纤维结构

(a) 非线性法平面增强 (b) 一种开式格状结构 (c) 一种柔性结构



## 管、容器的螺旋缠绕平面缠绕线型





# 复合材料的性能特点

比强度高

自重小

比弹性模量高

钢性强

抗疲劳与断裂  
安全性能好

大量的增强纤维对裂纹的扩展起到阻碍作用。

良好的减震性能

纤维增强复合材料具有较高的自震频率，不易产生共振现象，具有一定的减震作用。

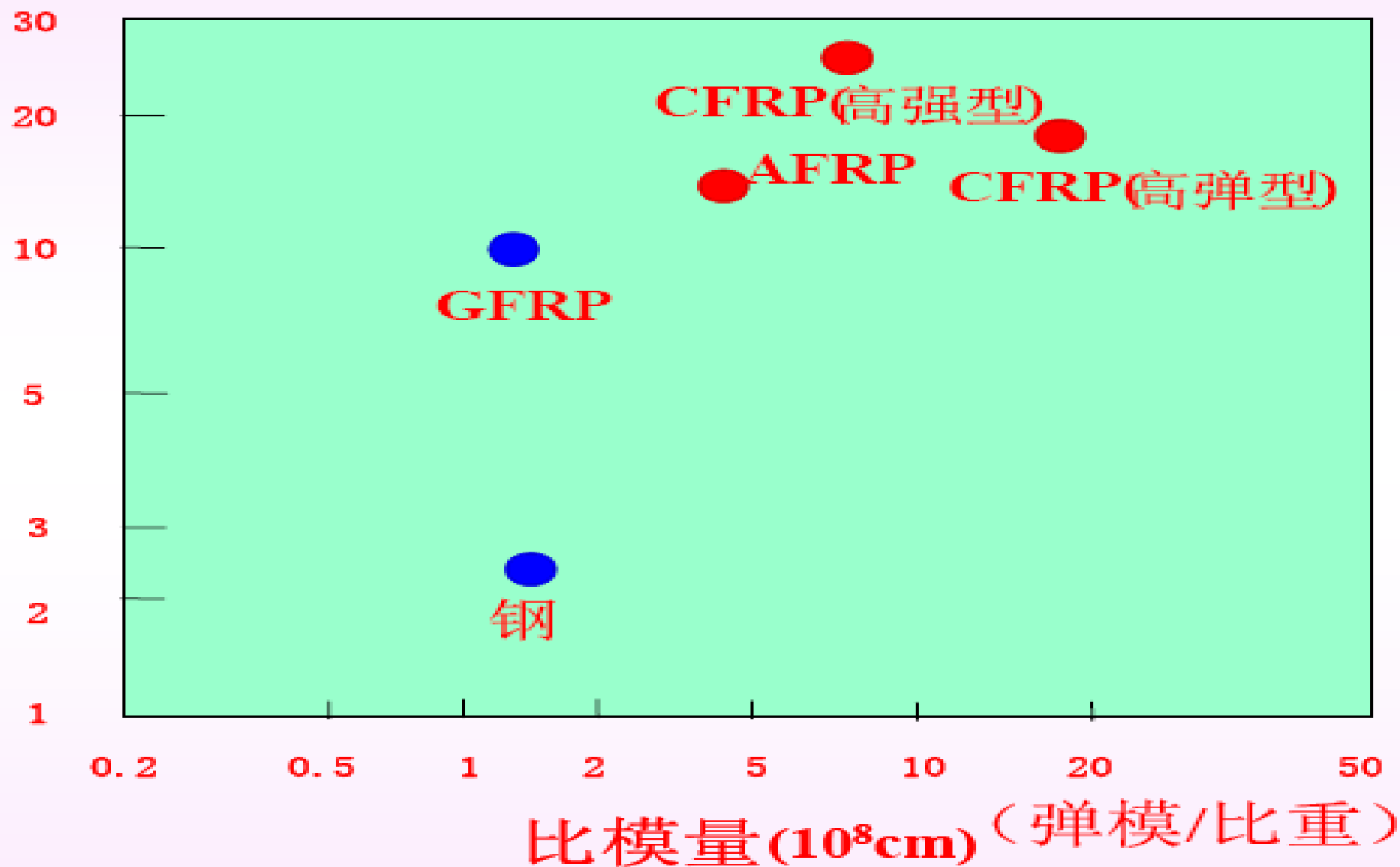
良好的高温性能

增强纤维的熔点都很高，并且在高温下仍具有较高的强度。

可设计性强

根据复合原理设计出具有特定功能的复合材料，性能对工艺的依赖性。

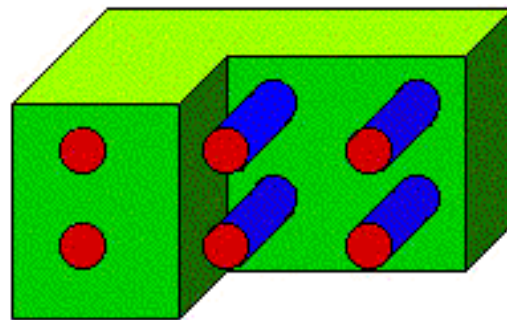
比强度( $10^6\text{cm}$ ) (强度/比重)



各种纤维的比强度与比模量

## 增强机理

### 1. 纤维增强



纤维增强复合材料是指由高强度、高弹性模量的脆性纤维作增强体与韧性基体或脆性基体经一定工艺复合而成的多相材料。

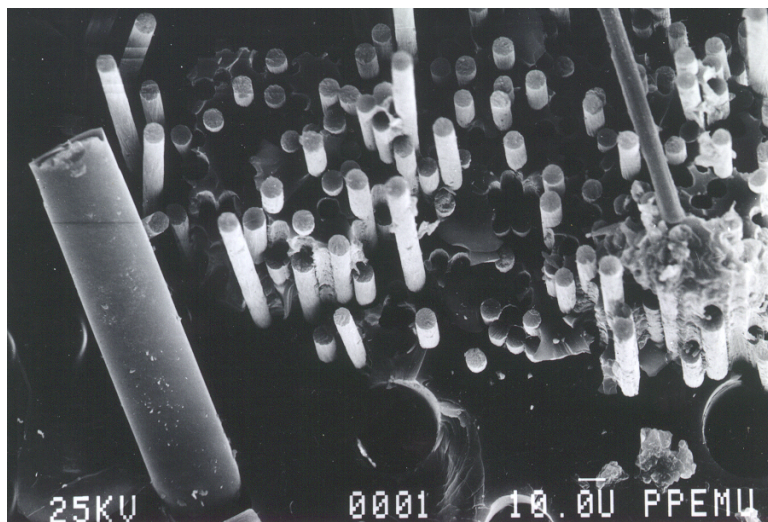
设计纤维增强复合材料的目标：

提高基体在室温下和高温下的强度和弹性模量。

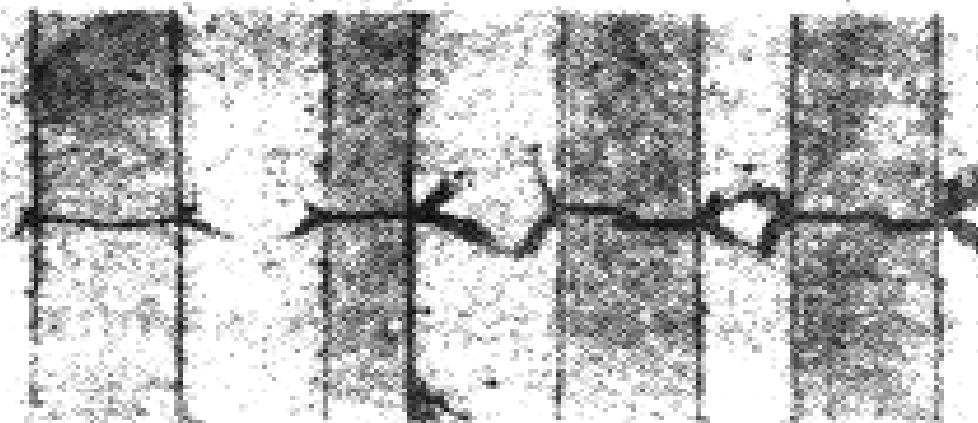
## 纤维增强复合材料的机理:

- 1、增强纤维因直径较小，产生裂纹的几率降低。
- 2、纤维的表面受到基体的保护，不易在承载中产生裂纹，增大承载力。
- 3、基体能阻止纤维的裂纹扩展。
- 4、基体对纤维的粘结作用、基体与纤维之间的摩擦力，使得材料的强度大大提高。

- 陶瓷基复合材料增强相是具有强结合键纤维阻止裂纹的产生，使脆性降低。
- 高分子基复合材料中纤维增强相有效阻止基体分子链的运动；
- 金属基复合材料中纤维增强相有效阻止位错运动而强化基体。



碳纤维环氧树脂复合材料断裂  
时纤维断口电子扫描照片

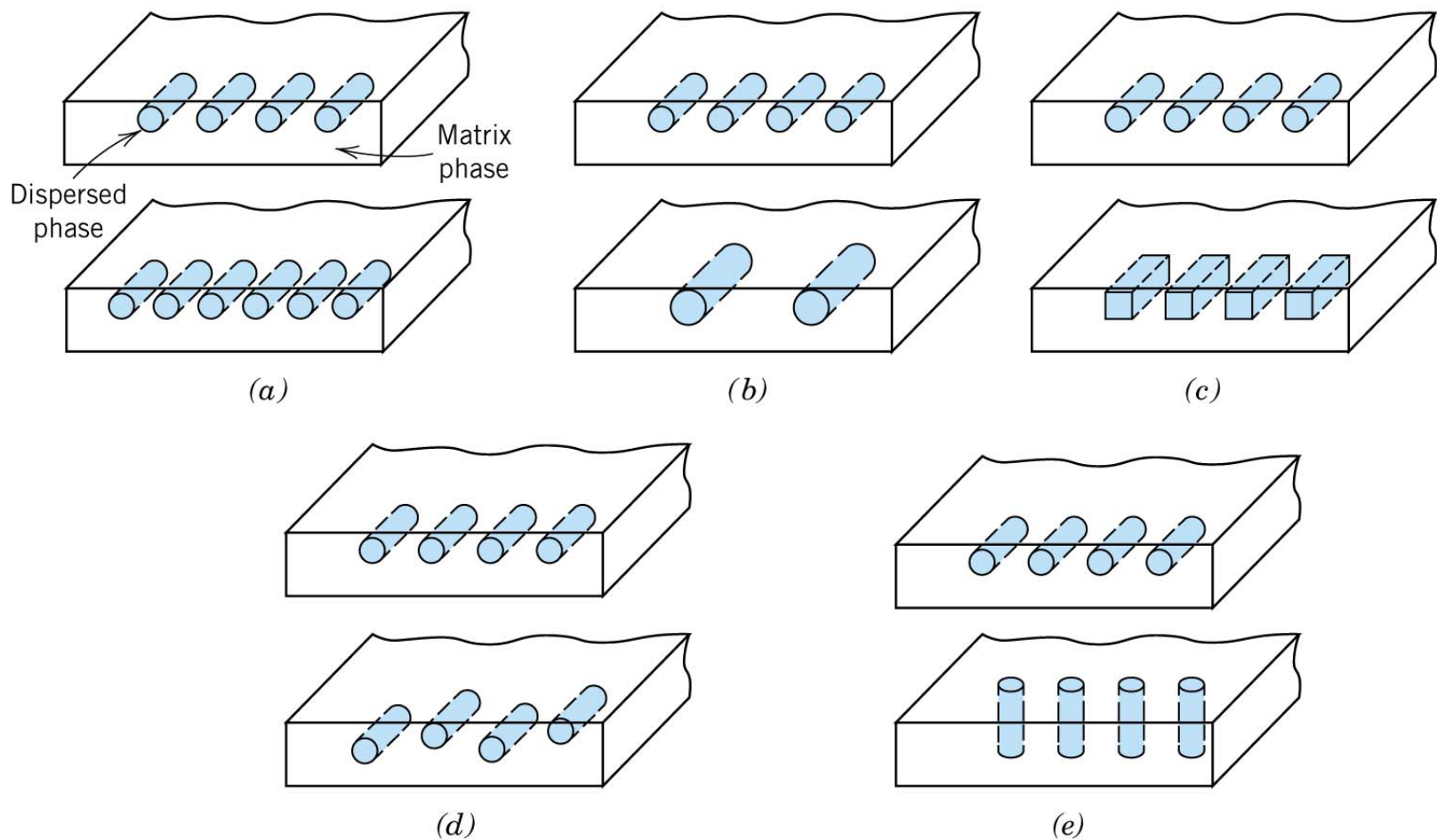


钨纤维铜基复合材料中的裂纹  
在铜中扩展受阻



增强纤维起到强化基体作用必要条件：

- 1、增强纤维的强度和弹性模量高。
- 2、纤维与基体之间有良好的相容性。
- 3、纤维应有一定的含量、尺寸和分布。
- 4、纤维与基体之间的线膨胀系数相匹配。

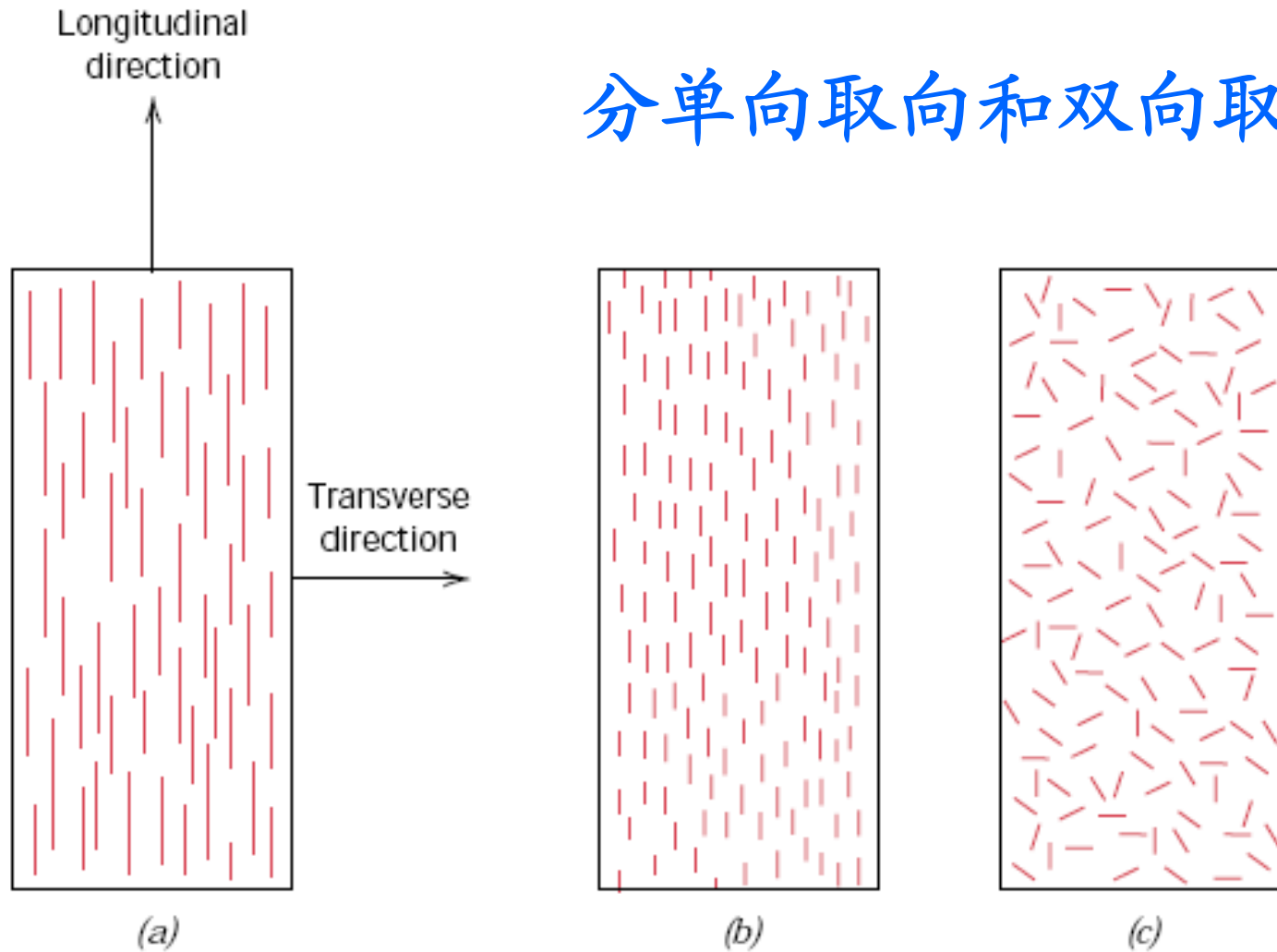


增强纤维的形状、分布及数量等均影响复合材料的性能

(a) 数量 (b) 大小 (c) 形状 (d) 分布 (e) 取向

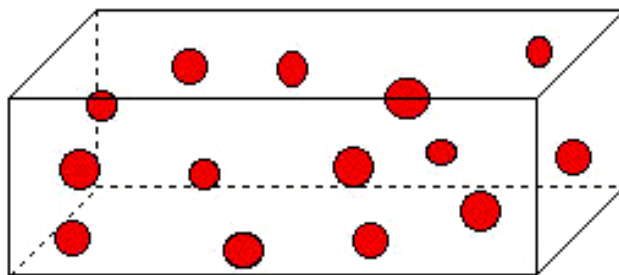
## 取向的影响

### 分单向取向和双向取向



## 增强机理

### 2. 颗粒增强



指由高强度、高弹性模量的脆性颗粒作增强体与韧性基体或脆性基体经一定工艺复合而成的多相材料。

颗粒增强复合材料的种类：

纳米硬颗粒弥散增强，微米颗粒增强。

## 弥散强化复合材料中弥散颗粒种类

金属氧化物

碳化物

硼化物

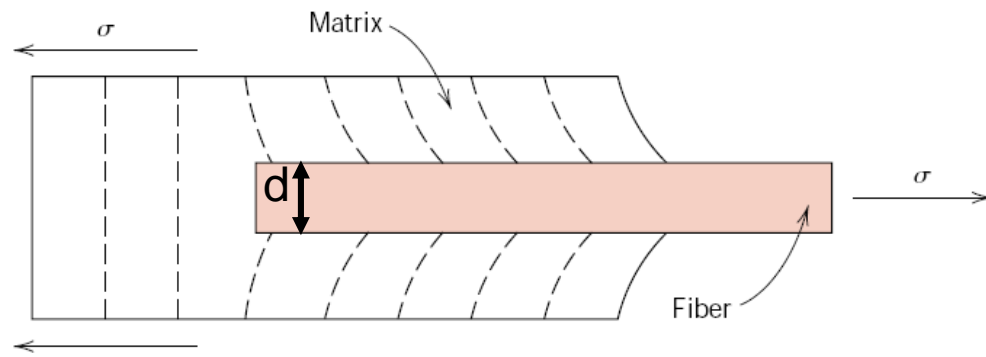
## 颗粒增强复合材料的机理：

弥散分布基体中的硬颗粒可以有效地阻止位错运动，产生显著的强化作用。



## 增韧机理

### 1. 纤维增韧



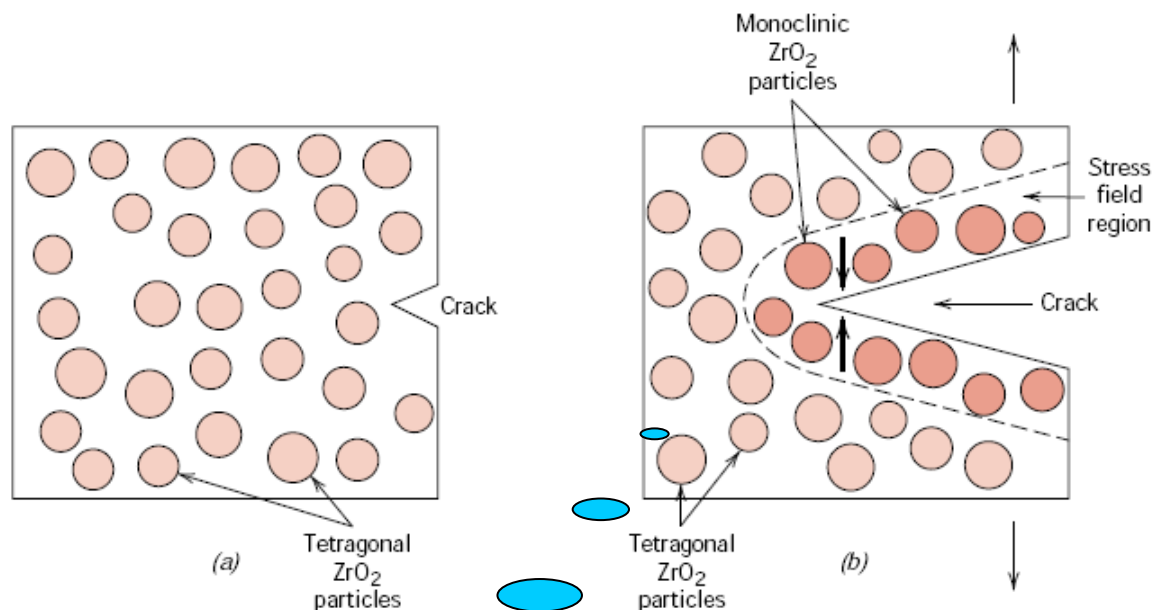
由于定向、取向或无序排布的纤维加入，使得复合材料的韧性得到显著提高。

纤维吸收裂纹尖端能量是靠纤维断裂及纤维从机体中拔出实现的。要求用于补强的纤维具有较高的强度且能与陶瓷有良好的粘结。

## 增韧机理

### 2. 颗粒增韧

增韧的机理主要包括相变增韧、裂纹转向增韧和分叉增韧。



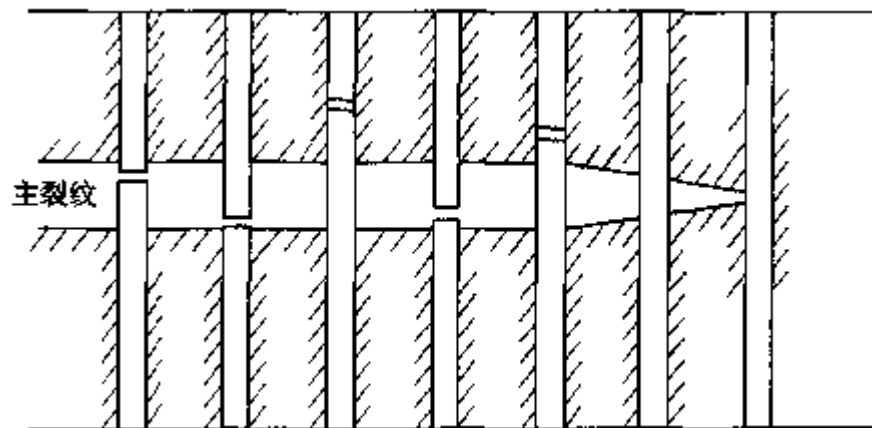
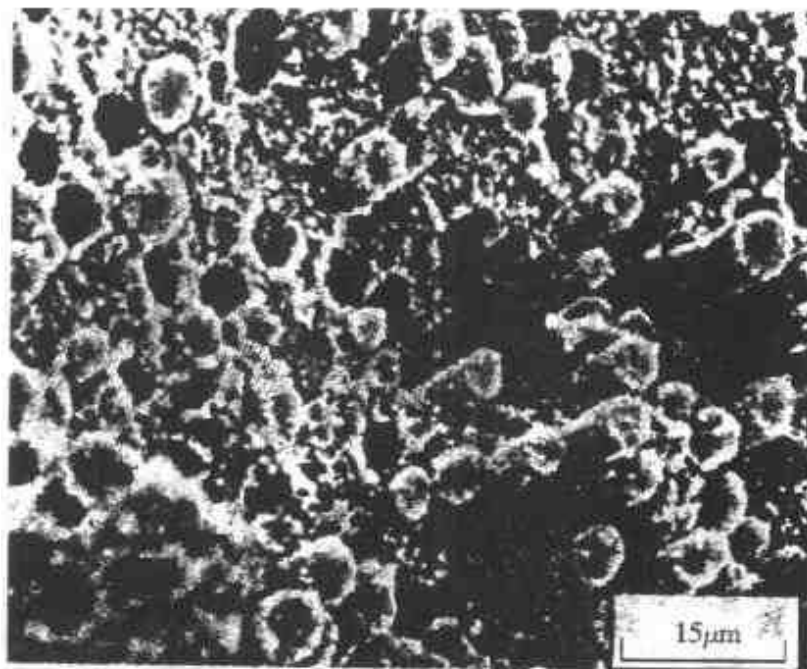
**ZrO<sub>2</sub>相变  
增韧**

通过相变产生的体积膨胀，产生压缩应力，从而抵消外加应力，阻止裂纹的扩展，达到增韧的目的。

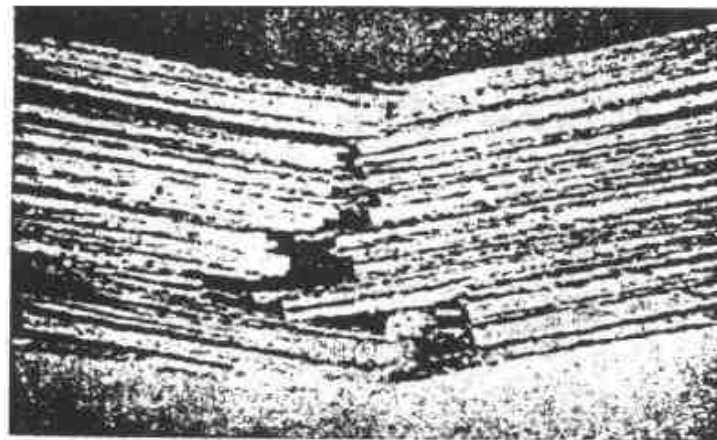
## 纤维吸收裂纹尖端能量

## 纤维断裂

## 纤维从基体中拔出



## 裂纹转向



**界面** 复合材料中基体与增强材料之间的结合面。这种结合面是基体和增强材之间发生相互作用和相互扩散而形成的。

## 复合材料的界面形成过程

理论上可分为三个阶段：

◆ **第一阶段**：增强体表面预处理或改性阶段。

- i) 界面设计与控制的重要手段
- ii) 改性层成为最终界面层的重要组成部分

◆ **第二阶段**：两相的接触与浸润过程

接触 - 吸附与浸润 - 交互扩散 - 化学结合或物理结合(化学结合可看作是一种特殊的浸润过程，是**界面形成与发展的关键阶段**)

◆ **第三阶段**：液态（或粘流态）组分的**固化过程**，即凝固或化学反应。

- i) 界面的固定（亚稳态、非平衡态）
- ii) 界面的稳定（稳态、平衡态）

## 复合材料的界面结构与性能特点

- **分层组成** 非单分子层基体表面层、增强体表面层、基体/增强体界面层三个部分;
- **梯度结构** 具有一定厚度的界面相(层)随厚度方向变化而变化,具有“梯度”特征;
- **界面效益** 界面的比表面积或界面相的体积分数很大(尤其是纳米复合材料)界面效应显著,复合材料复合效应产生的根源;
- **界面缺陷** 界面缺陷形式多样(包括残余应力),对复合材料性能影响十分敏感。



## 界面结合的类型

- 1、机械结合：借助增强纤维表面凹凸不平的形态而产生的机械铰合和基体与纤维之间的摩擦阻力形成。
- 2、溶解与浸润结合：液态或是粘流态基体对增强纤维的浸润，而产生的作用力，作用范围只有若干原子间距大小。
- 3、反应结合：基体与纤维之间形成界面反应层。
- 4、混合结合：上述三种形式的混合结合方式。

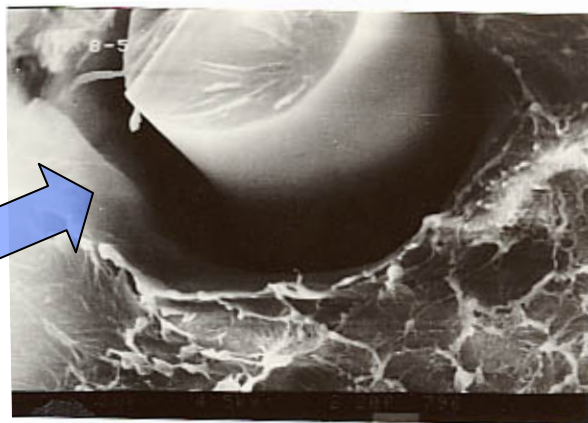
## 复合材料界面的类型

- 1、增强体与基体互不反应、互不溶解的界面。
- 2、增强体与基体不反应、但相互溶解的界面。
- 3、增强体与基体反应形成界面反应层。

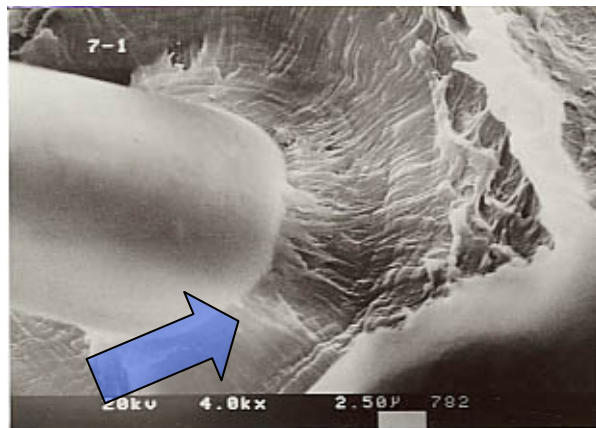
表面改性→不同相之间的相容性或是改变界面物理结合处粗糙程度。方法有基体改性和增强体改性两种。

## 怎样通过控制界面特征对材料性能产生作用？

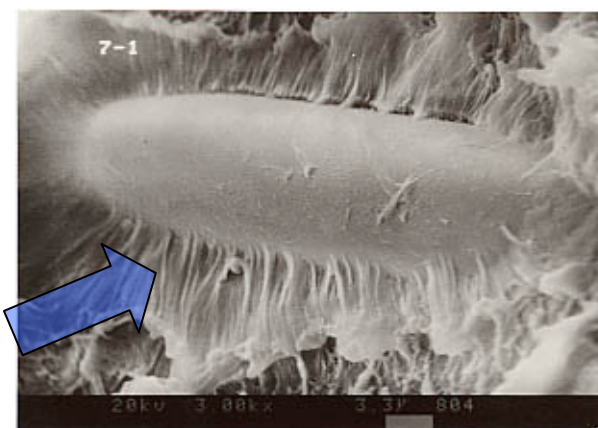
- 1、改变增强材料表面性质。
- 2、向基体内添加特定的元素。
- 3、在增强材料的表面施加涂层。



表面改性前



表面改性后



表面改性后

## ❖玻璃钢(玻璃纤维增强塑料, GFRP)

玻璃纤维增强

酚醛树脂、环氧树脂、聚酯树脂等  
热固性树脂基体—**热固性玻璃钢**;  
聚酰胺、聚丙烯、ABS、尼龙等热塑  
性树脂基体—**热塑性玻璃钢**。

**突出特点**

密度低:  $1.6 \sim 2.0\text{g/cm}^3$ ;

比强度高: 较最高强度的合金钢还高3倍;

耐烧蚀

耐腐蚀

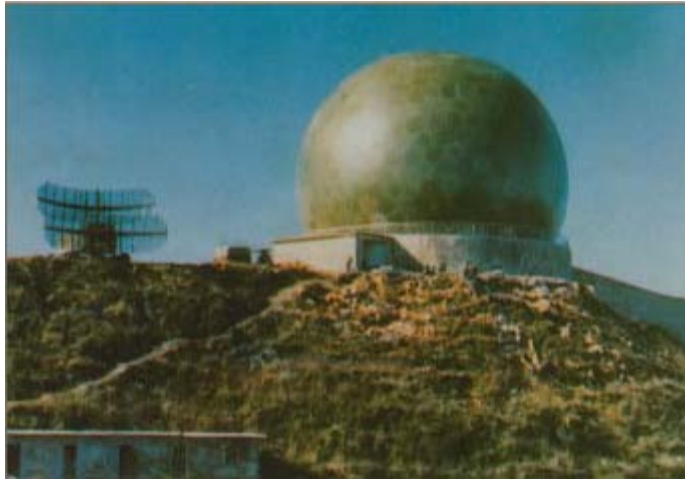
**应 用**

航空航天工业: 如雷达罩、机舱门、燃料箱、行李架和地板等。

火箭: 发动机壳体、喷管。

汽车工业: 如汽车车身、保险杠、车门、挡泥板、灯罩、内部装饰件等。

石油化工工业: 如玻璃钢贮罐、容器、管道、洗涤器、冷却塔等



酚醛树脂玻璃钢齿轮





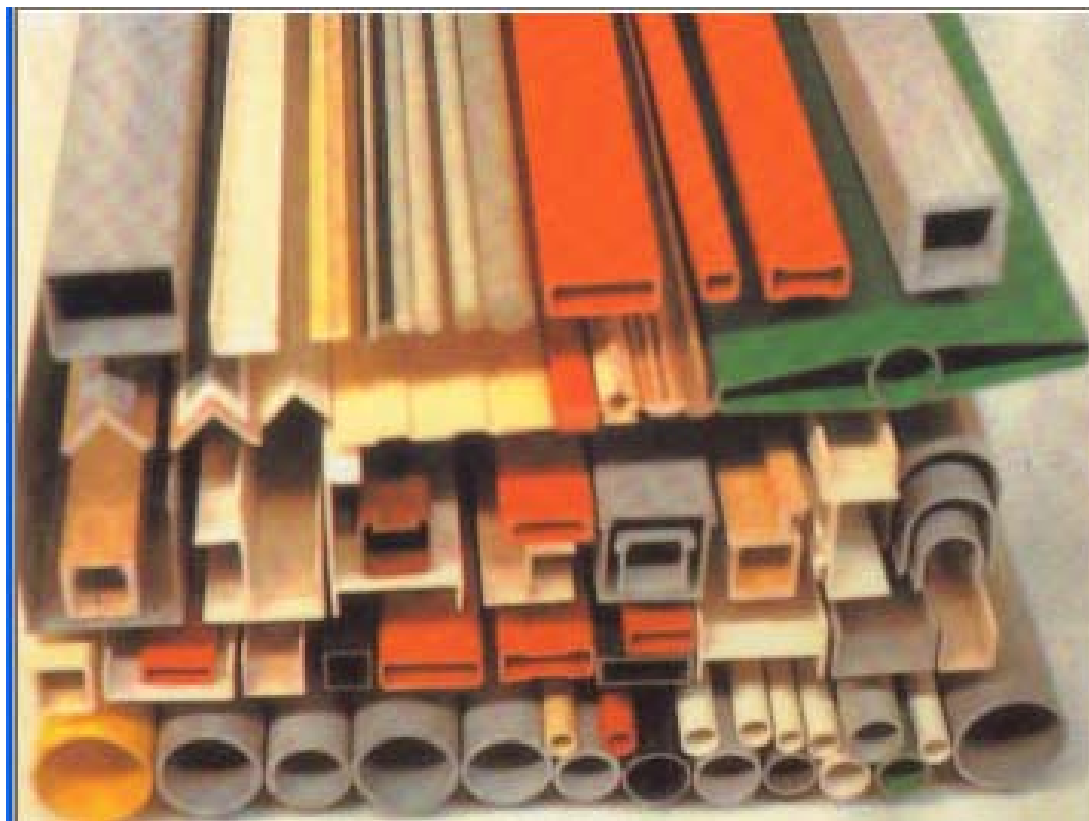
玻璃钢管道与接头在石油、化工工业中的应用



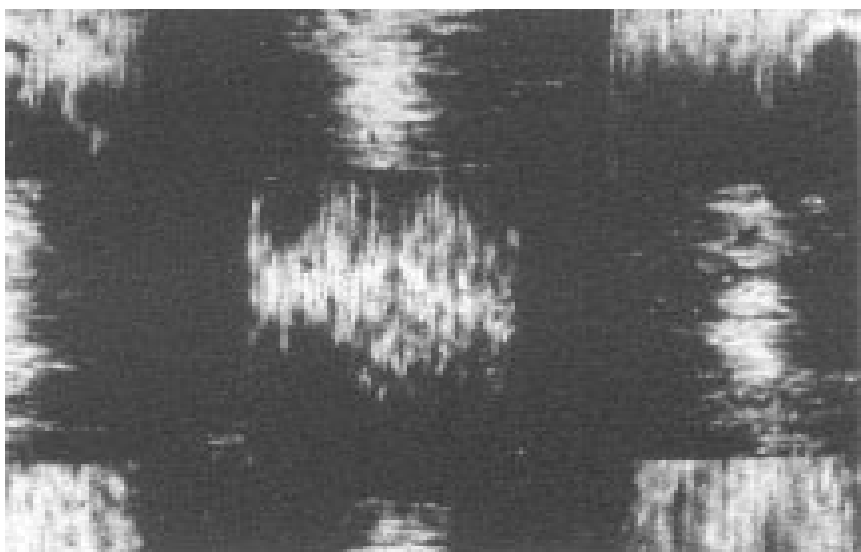
玻璃钢建筑材料用于上海  
东方明珠电视塔大堂装潢



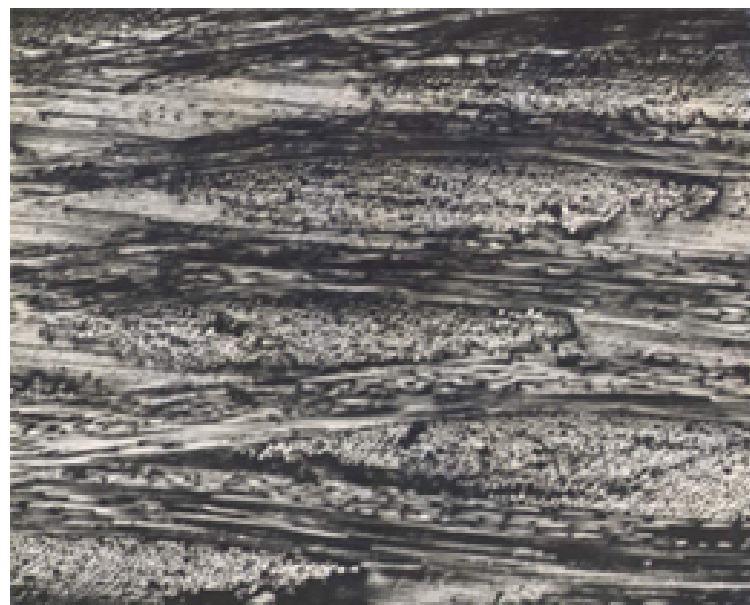
复合材料(玻璃钢)制作的渔船



各种玻璃钢型材制品



环氧树脂玻璃钢显微组织（横截面）



环氧树脂玻璃钢显微组织(表面)

## ❖碳纤维增强聚合物基复合材料 (CFRP)

### 突出特点

密度更低  
更高的比强度和比模量  
化学稳定性高  
高、低温力学性能好

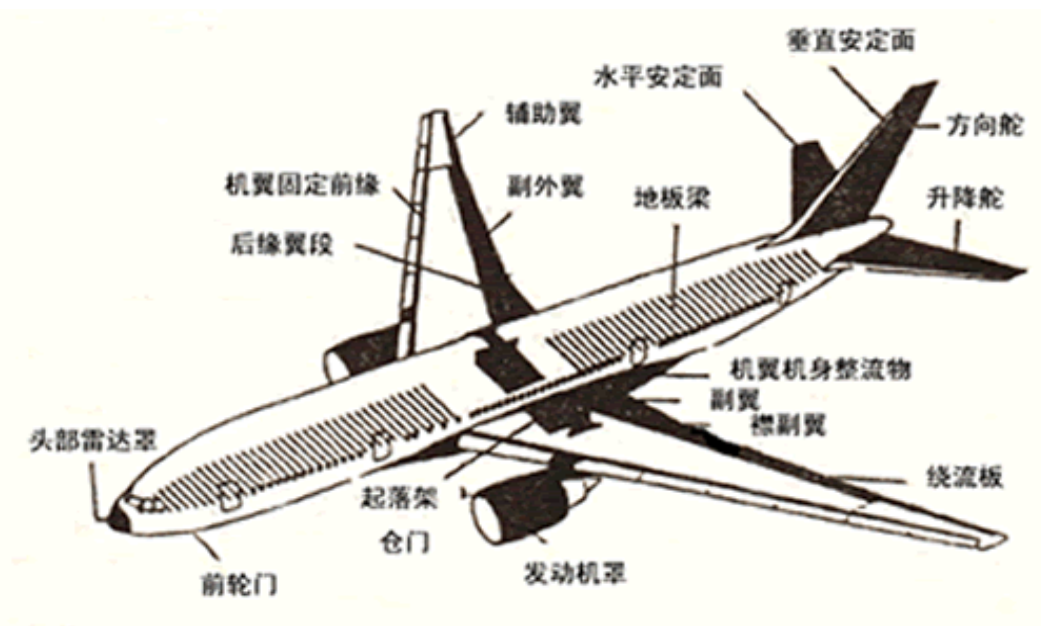
比玻璃钢的性能普遍优越

### 应用

航天工业：如航天飞机有效载荷门、副翼、垂直尾翼、主起落架门、内部压力容器等；空间站大型结构桁架及太阳能电池支架。

汽车工业：F-1方程式赛车车身

体育用品：网球拍、高尔夫球杆、钓鱼杆。



CFRP在民用飞机中的应用



CFRP在空间站大型结构  
桁架及太阳能电池支架  
中的应用



特点 - 具有与树脂基复合材料相同的高强度、高弹性模量和低线膨胀系数。

工作温度高、高韧性、导电、导热、不易燃烧、抗电磁干扰、抗辐射

可进行热处理和其它加工来进一步提高性能。

缺点 - 密度高、制作成本高、工艺复杂、增强材与基体间易发生化学反应等。

长纤维增强

短纤维或晶须  
增强

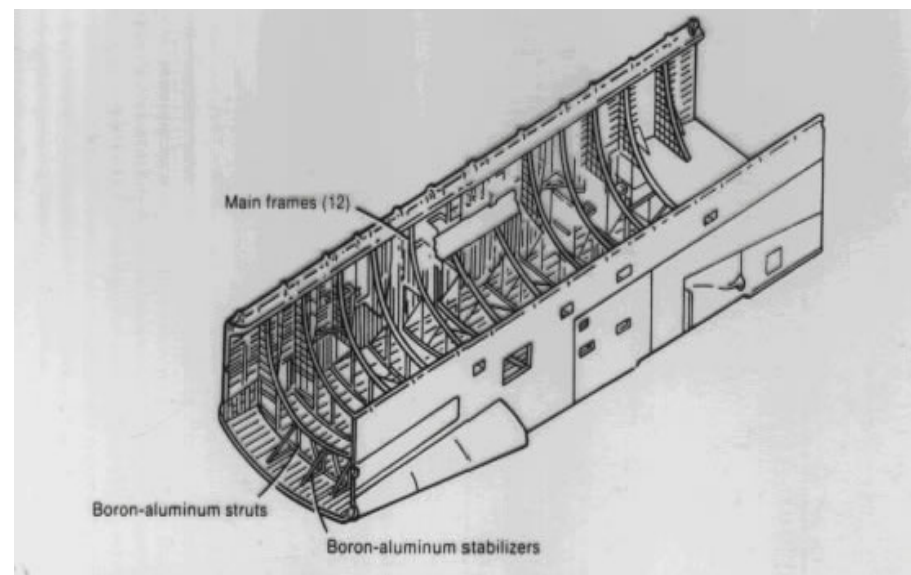
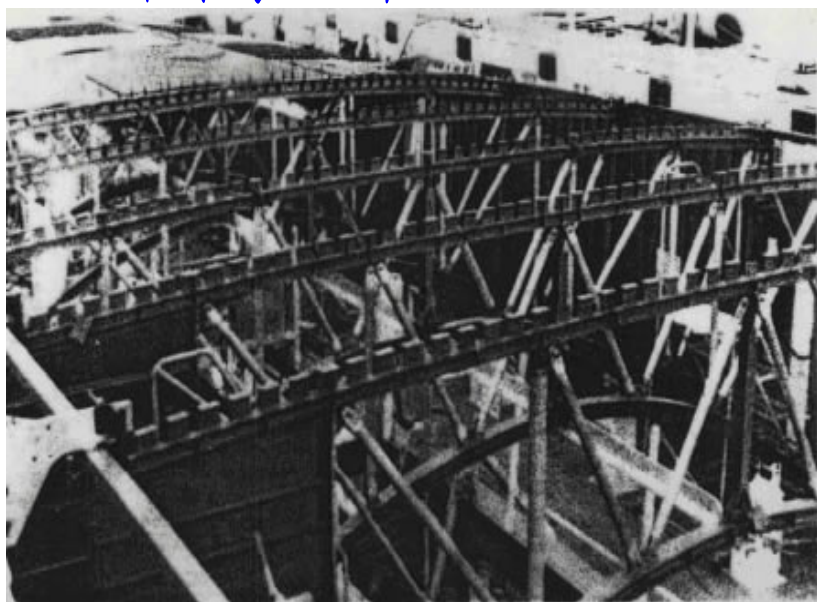
颗粒增强

原位复合增强

## 长纤维增强金属基复合材料

### 1、硼/铝复合材料

硼纤维高温强度高， $1500^{\circ}\text{C}$ 时蠕变速率低。但高温氧化后强度降低，所以一般在硼纤维表面涂覆一层 $\text{SiC}$ 或 $\text{B}_4\text{C}$ ，防止纤维表面氧化。



## 长纤维增强金属基复合材料

### 2、石墨/铝复合材料

具有导电性高、摩擦系数小和耐腐蚀等特点。利用石墨纤维表面沉积Ti/Bi涂层技术，可改善石墨纤维与液态铝的湿润性，有效控制铝与纤维的表面反应，提高复合材料的性能。

### 3、石墨/镁复合材料

这种材料密度低、线膨胀系数为零，尺寸的稳定性好，是金属基复合材料中具有最高比强度和比弹性模量的复合材料。可在石墨纤维表面沉积 $\text{TiB}_2$ ，提高石墨纤维的润湿性。

## 长纤维增强金属基复合材料

### 4、碳化硅/钛复合材料

碳化硅纤维比强度高、比模量高，高温强度高，耐热、耐氧化，与金属的反应小，润湿性好。

主要应用于飞机发动机部件和涡轮叶片以及火箭发动机箱体材料。

### 5、氧化铝/铝复合材料

氧化铝纤维在氧化气氛中稳定，能在高温下保持其强度、刚度，且硬度高，耐磨性好。这种复合材料具有高强度和高刚度，可用于汽车发动机活塞和其他发动机零件。

## 短纤维/晶须增强金属基复合材料

- 1、氧化铝/铝复合材料
- 2、碳化硅/铝复合材料
- 3、氧化铝/镍复合材料

# 金属基复合材料

## 颗粒增强金属基复合材料

1. 碳化硅/铝复合材料

2. 碳化钛/钛复合材料

3. 颗粒增强金属间化合物复合材料

**$\text{TiB}_2/\text{NiAl}$ 、 $\text{TiB}_2/\text{TiAl}$**





$\text{Al}_2\text{O}_3$ 短纤维/Al汽车  
活塞（活塞环）  
（丰田汽车公司）



SiCp/Al连杆，锻  
件替代钢连杆，减  
重6Kg（福特、通  
用汽车公司）



SiCp/Al,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ p/Al汽  
车刹车盘，减重60%  
（丰田、福特和通用  
汽车公司）

## 原位复合材料

采用定向凝固方法，使液态金属和合金在有规则的温度梯度场中进行冷却凝固，金属基体自身析出晶须或颗粒而得到的复合材料。

## 什么是陶瓷基复合材料？

在陶瓷基体中添加碳纤维、氧化铝纤维、碳化硅纤维、碳化硅晶须、氧化铝晶须、碳化硅颗粒和碳化钛颗粒，所形成的复合材料。

纤维的加入可以大大提高陶瓷材料的强度和韧性。

种类 - 颗粒增韧复合材料:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC颗粒

晶须增韧复合材料: SiC- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶须

纤维增韧复合材料: SiC-硼硅、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 玻璃纤维

特点 - 具有高强度、高模量、低密度、耐高温、耐磨、耐蚀和良好的韧性。

应用 - 制造高速切削工具和内燃机部件。

目前研究重点 - 作为高温、耐磨、耐蚀材料应用，如  
大功率内燃机的增压涡轮；  
航空航天器的热部件；  
车辆发动机；  
石油化工容器；  
废物垃圾焚烧处理设备等。

## 长纤维增强陶瓷基复合材料

### 1.碳/陶瓷基复合材料

具有很高的**高温强度**、**弹性模量**和**较高的韧性**。碳纤维增强的氮化硅陶瓷可在**1400度以上**的高温下长期工作

碳纤维增强的石英陶瓷复合材料，冲击韧性比烧结石英陶瓷高**40倍**、抗弯强度大**5-12倍**。可承受**1200-1500度**高温气流的冲击。

### 2.碳化硅/陶瓷基复合材料

碳化硅纤维可与多重陶瓷，如碳化硅陶瓷、氧化铝陶瓷、氧化锆陶瓷等复合。

碳化硅纤维通常采用**CVD**制备。

利用碳化硅纤维强化的碳化硅陶瓷，其断裂韧性提高**5-6倍**，抗弯强度提高**50 % 以上**，且基体与纤维之间的结合性能良好。

## 长纤维增强陶瓷基复合材料

### 3. 碳/碳复合材料( $C_f/C$ )

由碳纤维及其制品(碳毡、碳布等)增强的碳基复合材料。

由碳纤维及其制品作为预制体, 通过化学气相沉积法(CVD)或液态树脂、沥青浸渍碳化法获得C/C的基体碳来制备。

耐烧蚀性

导弹弹头和固体火箭发动机喷管  
航天飞机的鼻锥、机翼前缘

摩擦磨损性能

飞机的刹车盘; 赛车、高速列车的刹车制动材料

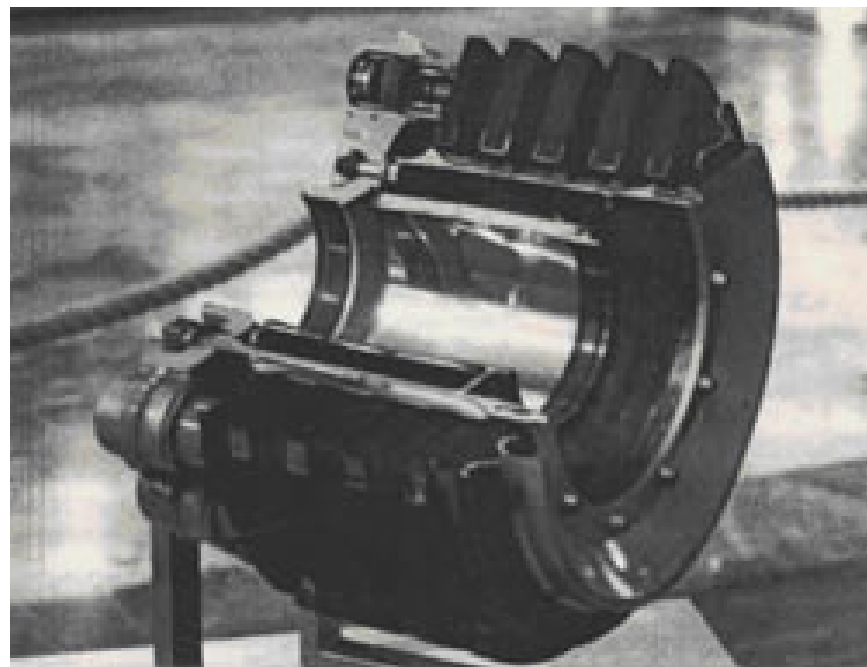
与人体的生物相容性

生物医学领域: 人工心脏瓣膜、骨骼、牙根、髋关节等

耐高温和低密度

航空发动机理想轻质材料





空中客车A320的C/C刹车装置

## 长纤维增强陶瓷基复合材料

### 4.碳化硅/陶瓷基复合材料

碳化硅纤维可与多种陶瓷，如碳化硅陶瓷、氧化铝陶瓷、氧化锆陶瓷等复合。

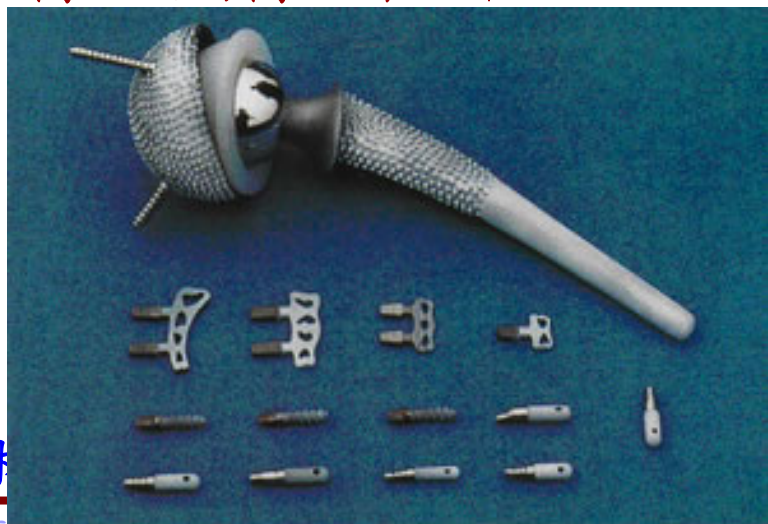
碳化硅纤维通常采用CVD制备。

利用碳化硅纤维强化的碳化硅陶瓷，其断裂韧性提高5-6倍，抗弯强度提高50%以上，且基体与纤维之间的结合性能良好。

## 短纤维、晶须、颗粒增强陶瓷基复合材料

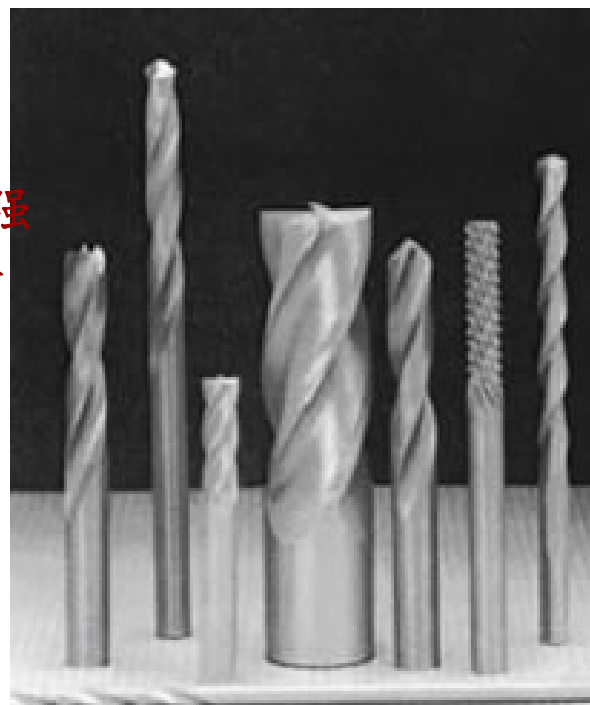


采用颗粒增强氮化硅刀具加工  
高硬度的高铬铸铁件



颗粒增强氮化硅刀具

SiC晶须增强  
氧化铝钻头



CMC人工关节

- **基 体** 主要起**粘结作用**，某些情况下也起**功能作用**
- **功能体** 复合材料的**功能特性**  
不同特性的功能体——特性各异的功能复合材料。

## 特 点

应用面宽

研制周期短

附加值高

小批量，多品种

适于特殊用途

## 按功能特性分类

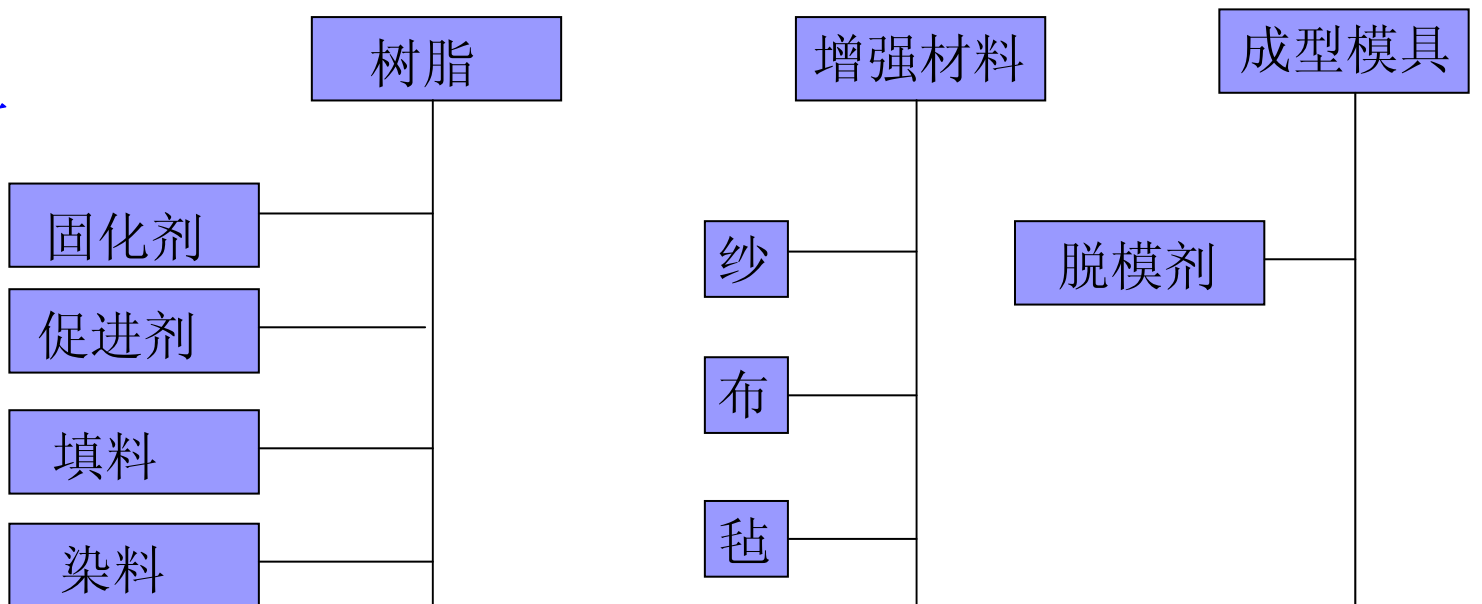
磁功能、电功能、光功能、热功能、  
摩擦功能、阻尼功能、防弹功能、  
辐射功能等。

## 复合材料的制备工艺及特点

- 复合材料的制备工艺：将两种或两种以上不同性质的材料组合在一起而采用的“适当方法”。
- 复合材料的制备工艺特点：
  - (1) 材料的形成与制品的成型同时完成。复合材料的生产过程也就是复合材料制品的生产过程。复合材料的工艺水平直接影响材料或制品的性能。
  - (2) 复合材料的成型比较方便。一种复合材料制品可以用多种方法成型，有选择余地。

## 复合材料产品的生产流程图

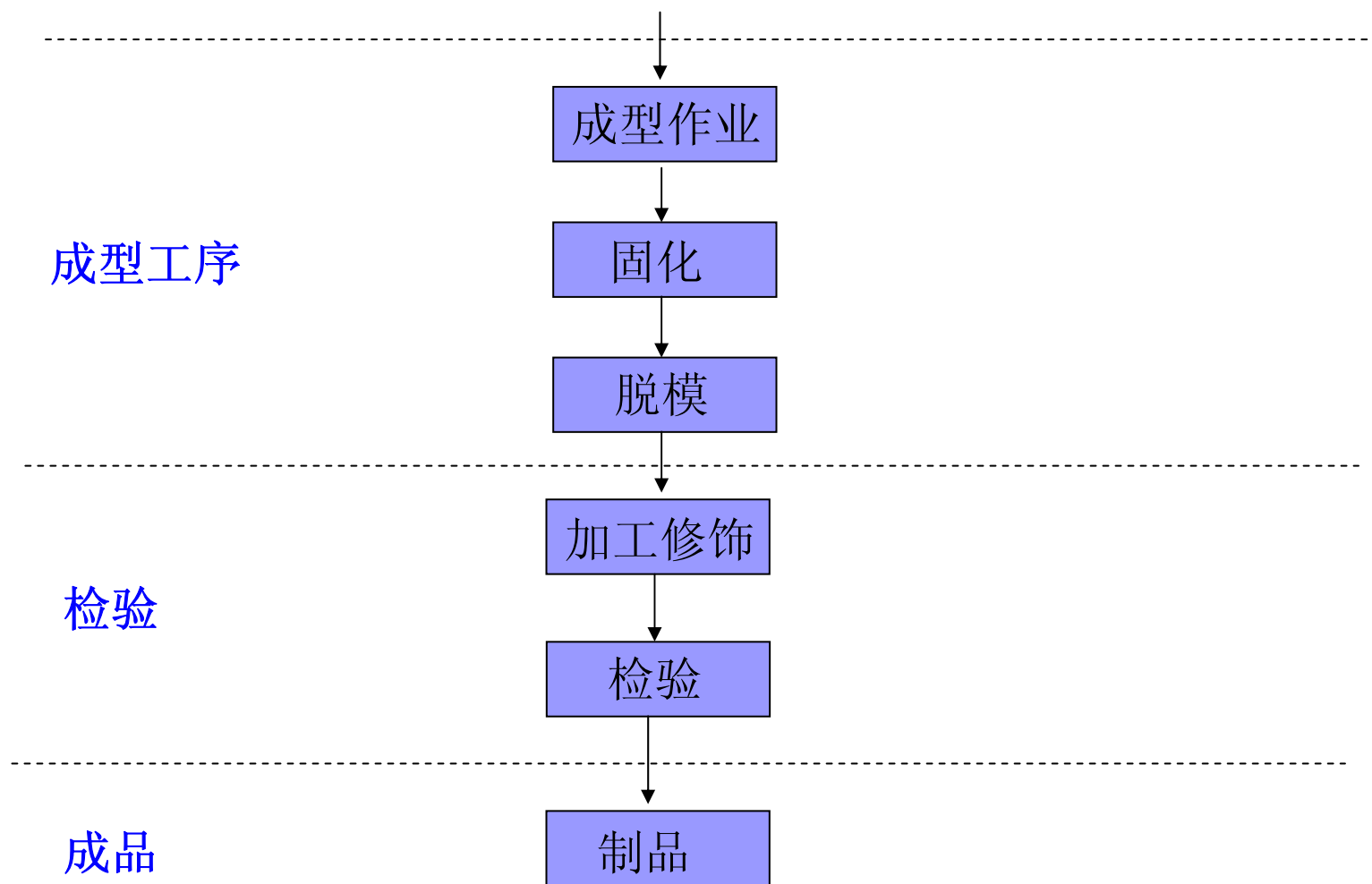
原材料



准备工序



# 复合材料的制备工艺

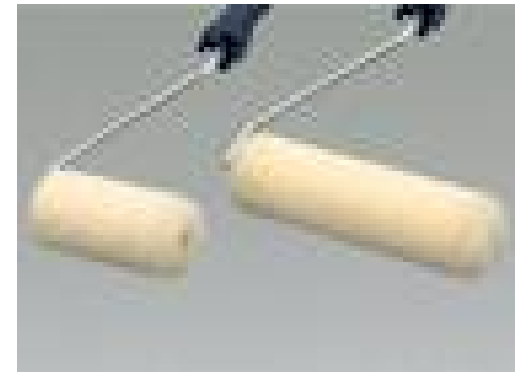
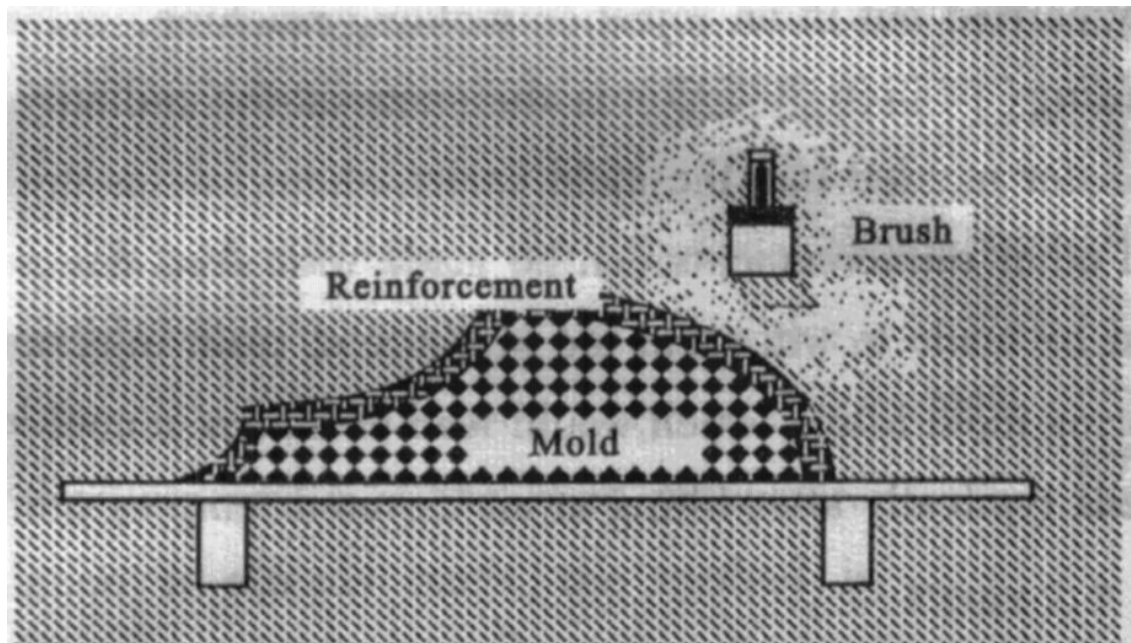


## 聚合物基复合材料的制备工艺

- 手糊成型工艺
- 喷射成型工艺
- 铺层工艺
- 模压成型工艺
- 缠绕成型工艺
- 挤拉成型工艺

## 手糊成型工艺

用手工工具将布或纤维毡浸上树脂胶液，铺糊在敞开模具上，经室温固化和脱模获得制品的工艺方法。



## 手糊成型工艺

### 优点:

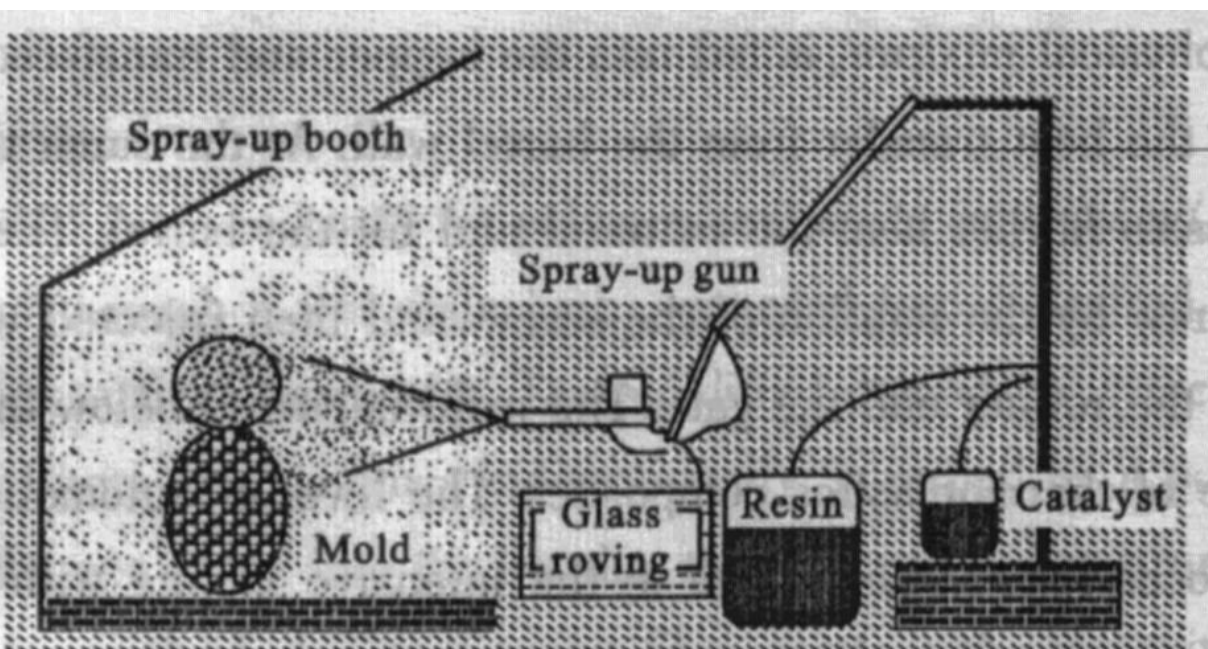
- 形状任意、复杂
- 设备简单、投资小、折旧低
- 工艺简单
- 可任意添补
- 树脂量高，耐腐蚀

### 缺点:

- 效率低下
- 工作环境差
- 产品质量不稳
- 产品力学性能不好
- 批量小

## 喷射成型工艺

- (1) 利用高压空气将树脂系统（固化剂、引发剂、促进剂等和短纤维从喷枪上不同喷嘴同时喷出并均匀沉积到模具上。
- (2) 待沉积到一定厚度，用手辊滚压，使纤维浸透树脂，压实并除去气泡，室温固化成型得到产品。



## 喷射成型工艺

### 优点:

- 效率高
- 成本低
- 整体性（无缝）
- 产品壁厚可调节

### 缺点:

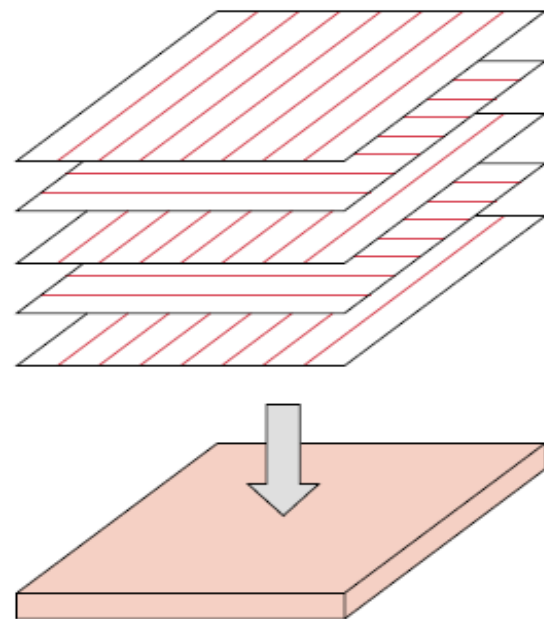
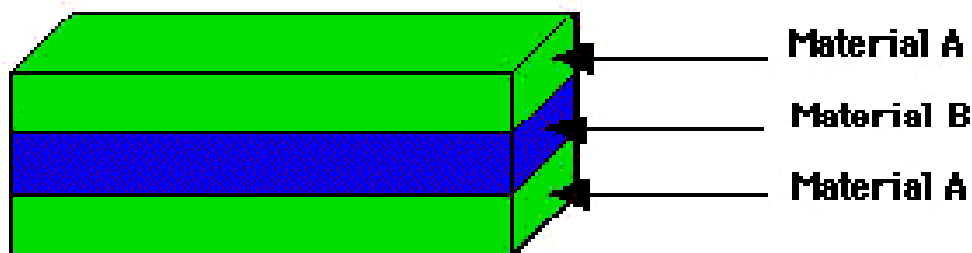
- 污染大
- 树脂用量大
- 制品强度低（短切）



## 铺层工艺

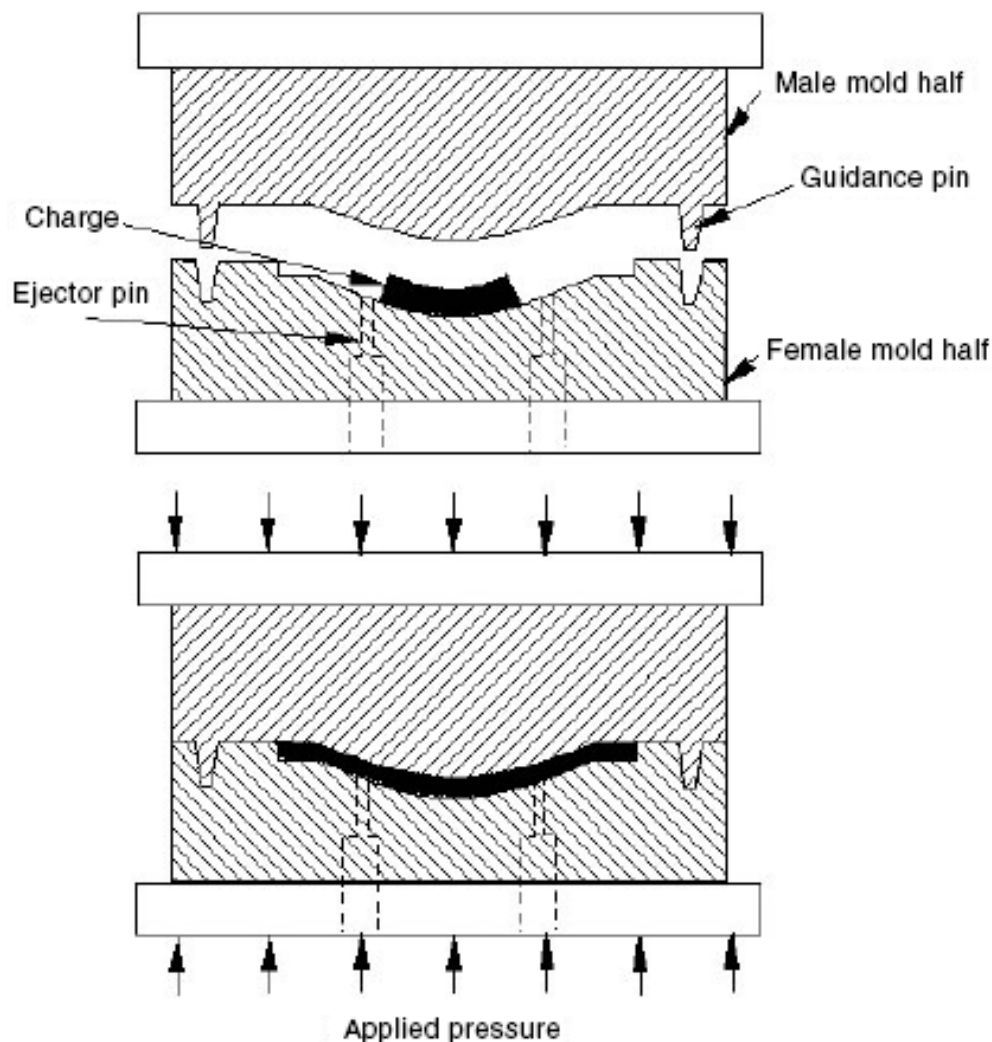
指用手工铺叠方式，将预浸材料（无纬布、无纬带、编织物等）按预定方向和顺序在模具内逐层铺贴直至所需的厚度，经加温加压固化、脱模、修整而获得制品的过程。

制品强度较高，可根据不同方向的受力情况制成强度各向异性的产品。



## 模压成型工艺

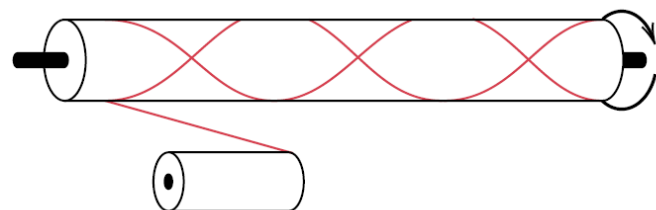
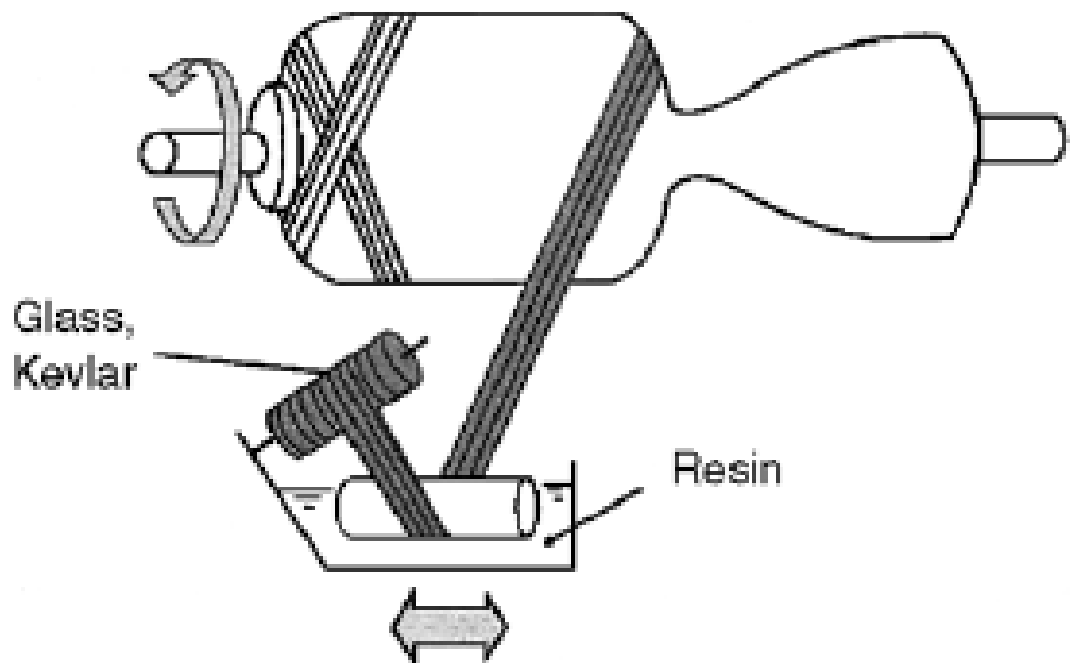
将一定量的模压料放入金属对模中，在一定的温度和压力作用下，使模塑料在模腔内受热塑化、受压流动并充满模腔成型固化而获得制品的一种方法。



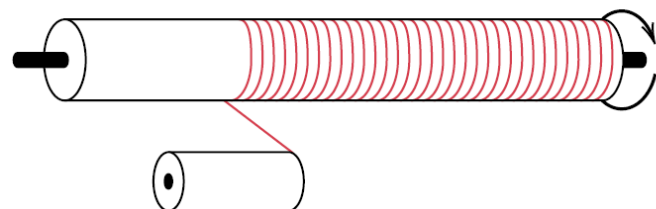
## 缠绕成型工艺

将浸过树脂胶液的连续玻璃纤维或布带，按照一定规律缠绕到芯模上，然后固化脱模成为增强材料制品的工艺过程。

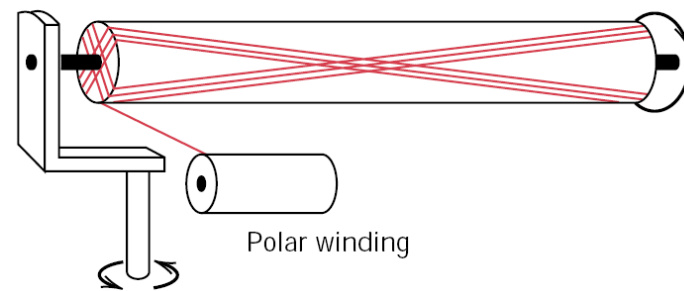
三大过程：预浸、缠绕、固化脱模。



Helical winding

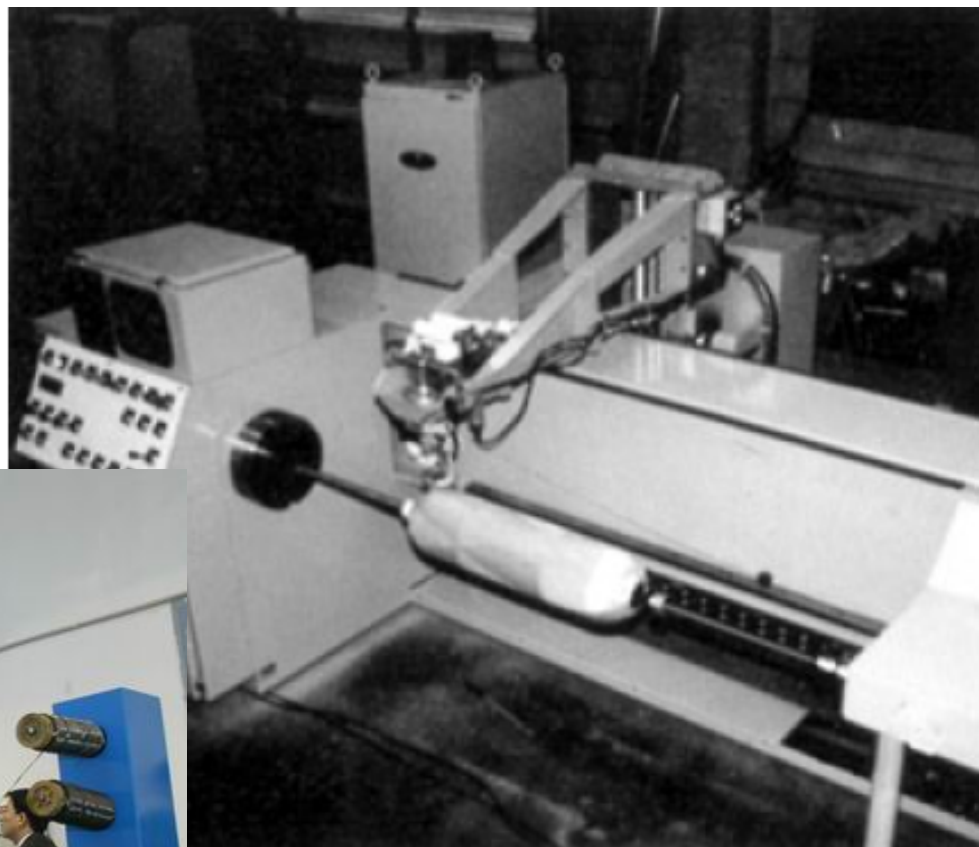


Circumferential winding



Polar winding

## 缠绕成型工艺



## 1、比强度高

原因：(1)表面缺陷小

(3)可控方向与数量，实现等强

(2)避免纵横交织点和末端的应力集中

(4)纤维含量高80%

2、可靠性高：克服材料的韧性不够及缺口带来的可靠性降低。

3、生产效率高：机械化，大批量。

4、成本低：无捻减少了纺织等其它工费。

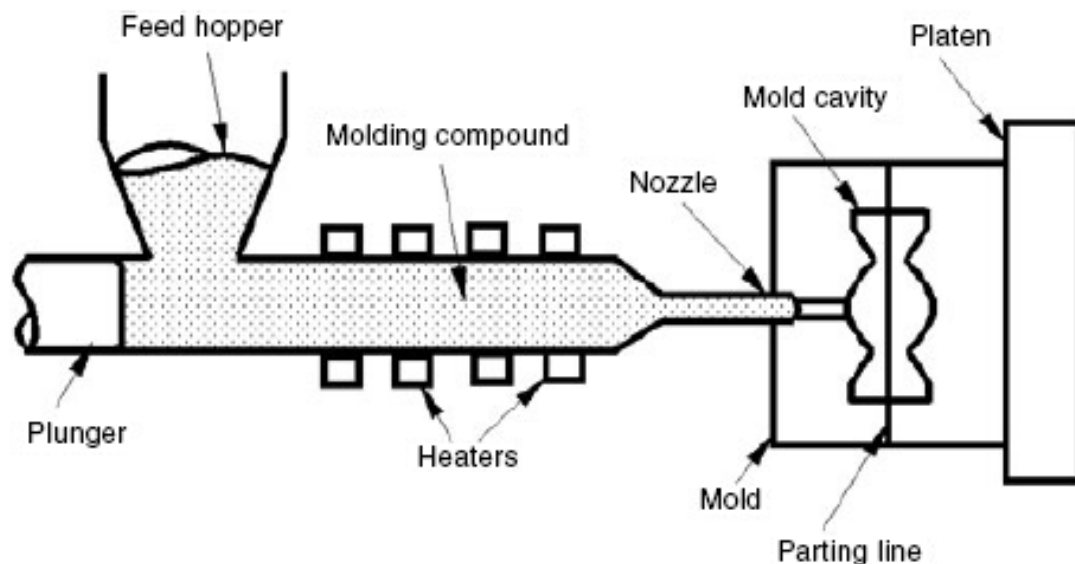
缺点：形状限制，投资大，必须大批量。



## 注射成型工艺

注射成型是将粒状或粉状的纤维——树脂混合料从注射机的料斗送入机筒内，加热熔化后，由柱塞或螺杆加压，通过喷嘴注入温度降低的闭合模内，经冷却定型后，脱模得到制品。

这是一种间歇式操作过程，适用于热塑性和热固性复合材料。





## 注射成型工艺

### ■ 优点:

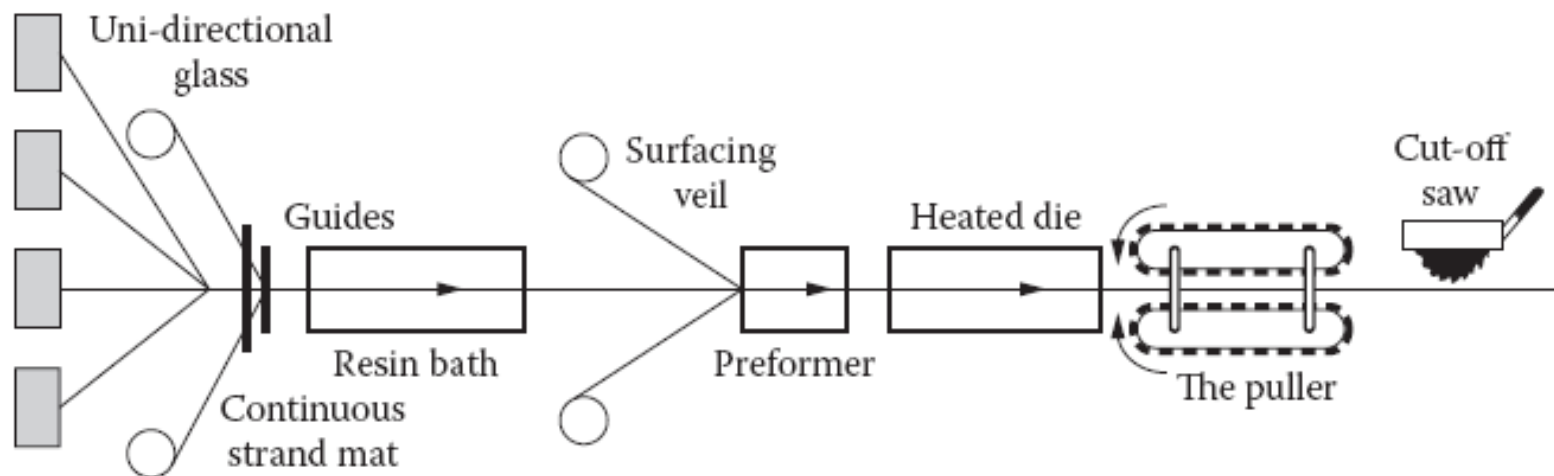
- 成型周期短
- 热耗量少
- 闭模成型
- 复杂产品一次成型，防变形或位移
- 生产效率好，成本低

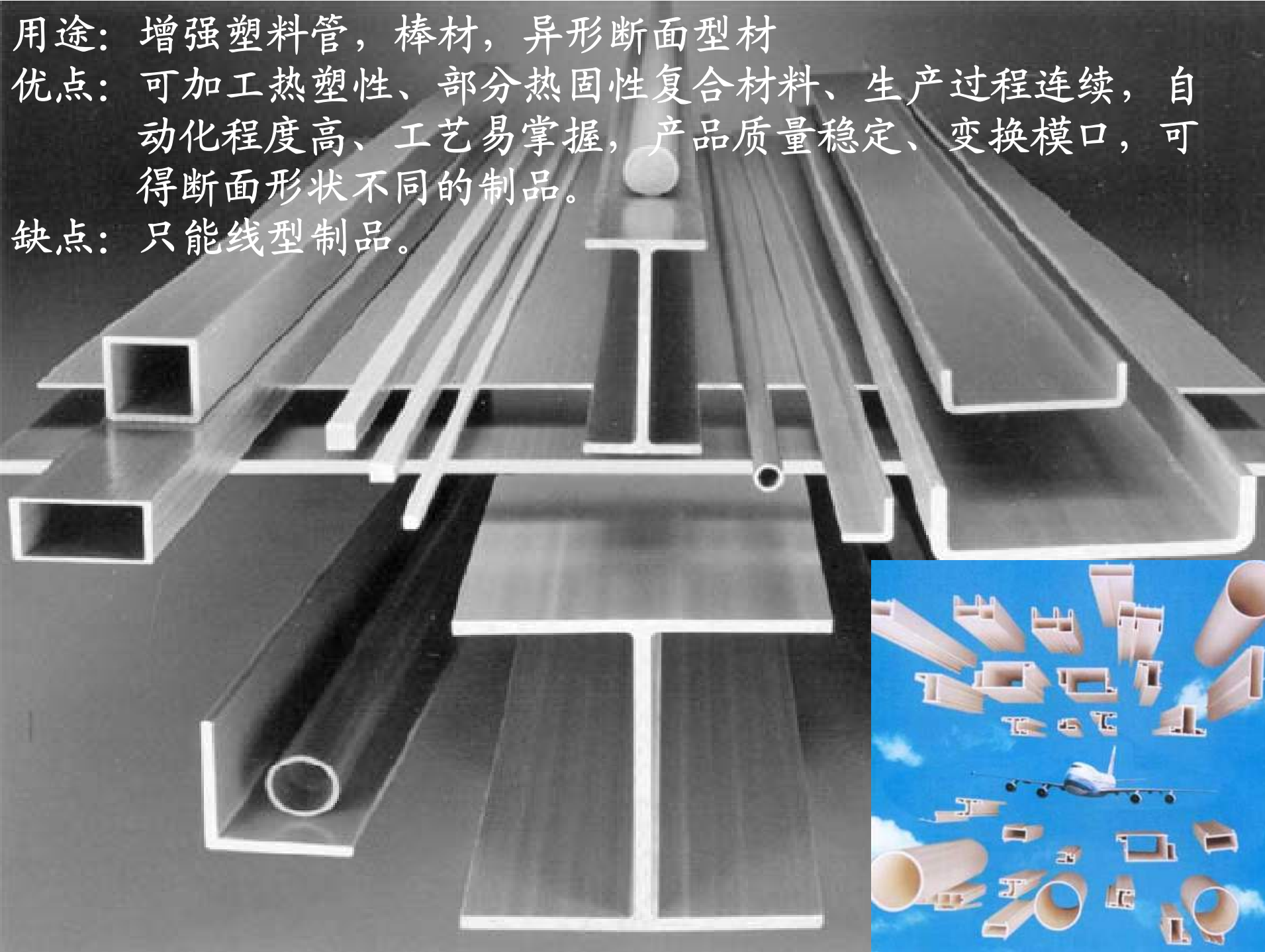
### ■ 缺点:

- 不适用于长纤维的产品
- 模具质量要求高

## 挤出成型工艺

挤出成型工艺特点：借助旋转螺杆的推挤，使处在一定温度和压力下呈熔融流动状态的热塑性物料连续地通过一个口模，然后降低温度，硬化定型，得到口模所限定的形状的复合材料性材料（杆、管、角材等）

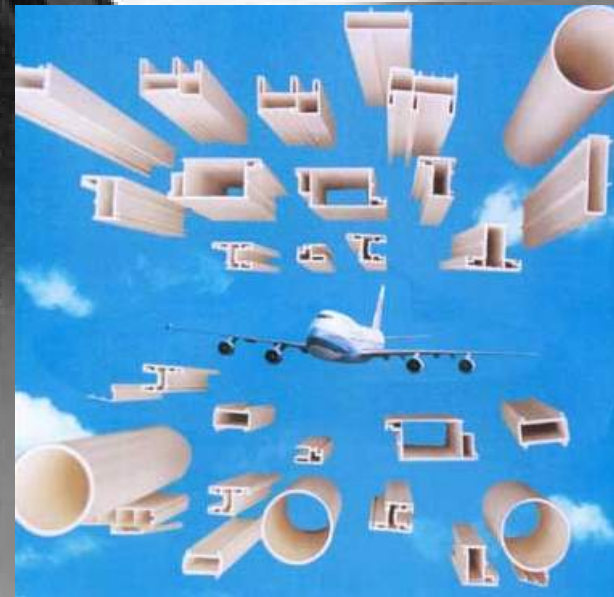




用途：增强塑料管，棒材，异形断面型材

优点：可加工热塑性、部分热固性复合材料、生产过程连续，自动化程度高、工艺易掌握，产品质量稳定、变换模口，可得断面形状不同的制品。

缺点：只能线型制品。



## 连续成型工艺

指从添加原材料到制成玻璃钢制品的整个过程都是在连续不断的进行。

种类：

- 连续制管
- 连续制板
- 拉挤成型
- 复合管生产

## 四种连续工艺

## 工艺特点

### ➤ 连续制管

- ✓ 连续管—效率高，投资大，品种少
- ✓ 连续复合管—品质高，高强，高性能，多用途

### ➤ 连续制板 浸胶毡定形固化而成。

### ➤ 连续拉挤—生产型材

### ➤ 离心法制管—低成本玻钢管

### ➤ 连续化

### ➤ 定制长度

### ➤ 一芯即可

### ➤ 工艺稳定

### ➤ 结构多样

宏观复合 → 微观复合

微纤增强复合材料、纳米复合材料、分子复合材料

简单复合 → 多元混杂复合、超混杂复合

两种纤维的复合应用，两种基体的复合应用

结构复合 → 结构复合与功能复合并重

被动复合 → 主动复合

具备能自诊断、自适应和自修补作用的新型复合材料。

常规设计 → 仿生设计

仿生设计是利用某种生物体的功能机制设计出新的功能材料。

## 微米复合 → 纳米复合

### ■ 从增强体角度:

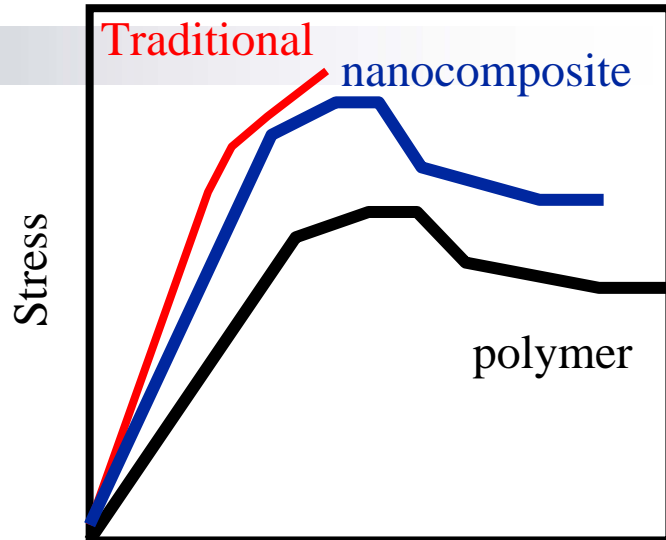
- 材料的屈服强度与晶粒尺寸平方根成反比, 随晶粒的细化材料强度将显著增加。

### ■ 从界面角度:

- 在纳米尺寸范围内复合而成。
- 界面面积非常大, 很强的界面相互作用 → 界面模糊。
- 界面面积大, 提供足够的晶界滑移机会, 导致形变增加, 在保持刚性, 同时提高韧性。

### ■ 从功能体角度:

- 纳米分散相有大表面积和强界面相互作用, 复合材料表现出不同于一般宏观复合材料的力学、热学、电学、磁学和光学性能, 还可能具有原组分不具备的特殊性能和功能, 为设计制备高性能、多功能新材料提供了新的机遇。





- 复合材料概论，王荣国主编，哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1999
- 材料概论，周达飞主编，北京：化学工业出版社，2001，第一版