

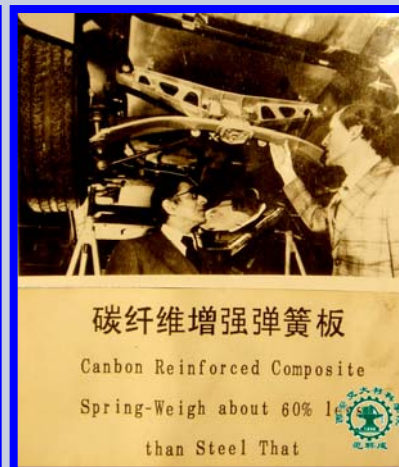
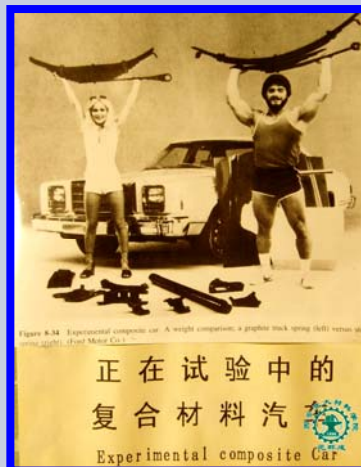
西安交通大学



材料科学与工程学院

第九章 复合材料

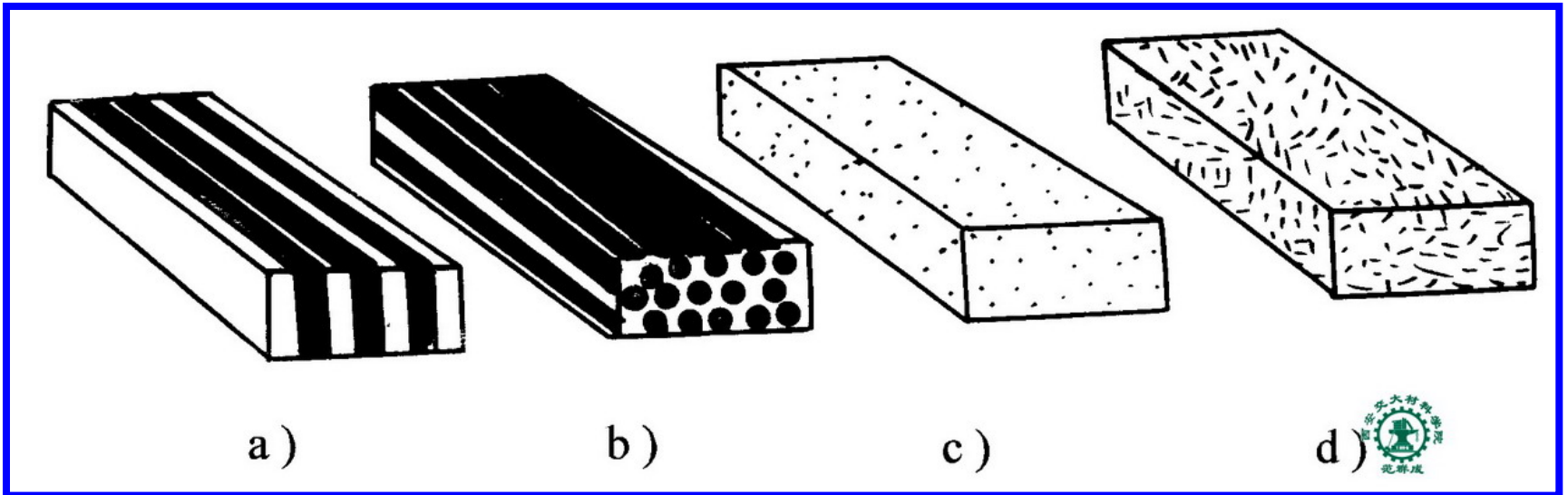
COMPOSITE MATERIALS



第一节 概述

复合材料 — 用多种不同性质的材料，通过不同的工艺方法人工合成的多相材料

一、复合材料的分类



复合材料结构示意图
a) 叠层复合材料
b)、d) 纤维增强复合材料
c) 颗粒增强复合材料

按基体相性质

{ 金属基复合材料
非金属基复合材料

按增强相形态

{ 颗粒增强复合材料
纤维增强复合材料
叠层复合材料

THE END

表 9-1 复合材料的种类

增强体		基体							
		金 属	无 机 非 金 属				有 机 材 料		
			陶 瓷	玻 璃	水 泥	碳	木 材	塑 料	橡 胶
金 属		金属基 复合材料	陶瓷基 复合材料	金属网 嵌玻璃	钢筋水 泥	无	无	金属丝增 强塑料	金属丝增强 橡胶
无 机 非 金 属	陶瓷 { 纤维 粒料	金属基 超硬合金	增强陶瓷	陶瓷增 强玻 璃	增强水 泥	无	无	陶瓷纤维 增强塑料	陶瓷纤维增 强塑料
	碳素 { 纤维 粒料	碳纤维 增强金属	增强陶瓷	陶瓷增 强玻 璃	增强水 泥	碳纤增 强碳复 合材料	无	碳纤维增 强塑料	碳纤、碳黑增 强橡胶
	陶瓷 { 纤维 粒料	无	无	无	增强水 泥	无	无	玻璃纤维 增强塑料	玻璃纤维增 强橡胶
有 机 材 料	木材	无	无	无	水泥木 丝板	无	无	纤维板	无
	高聚物纤维	无	无	无	增强水 泥	无	塑料 合板	高聚物纤 维增强塑 料	高聚物纤维 增强橡胶
	橡胶胶粒	无	无	无	无	无	橡胶 合板	高聚物合 金	高聚物合金

二、复合材料的性能特点

1. 比强度和比模量高

表 9-2 金属材料与纤维增强复合材料性能比较

材料 \ 性能	密度 /g·cm ⁻³	抗拉强度 /10 ³ MPa	拉伸模量 /10 ⁵ MPa	比强度 /10 ⁶ N·m·kg ⁻¹	比模量 /10 ⁶ N·m·kg ⁻¹
钢	7.8	1.03	2.1	0.13	27
铝	2.8	0.47	0.75	0.17	27
钛	4.5	0.96	1.14	0.21	25
玻璃钢	2.0	1.06	0.4	0.53	20
高强度碳纤维-环氧	1.45	1.5	1.4	1.03	97
高模量碳纤维-环氧	1.6	1.07	2.4	0.67	150
硼纤维-环氧	2.1	1.38	2.1	0.66	100
有机纤维 PRD-环氧	1.4	1.4	0.8	1.0	57
SiC 纤维-环氧	2.2	1.09	1.02	0.5	46
硼纤维—铝	2.65	1.0	2.0	0.38	75



Figure 8-34 Experimental composite car. A weight comparison; a graphite truck spring (left) versus steel spring (right). (Ford Motor Co.)

正在试验中的
复合材料汽车



Experimental composite Car

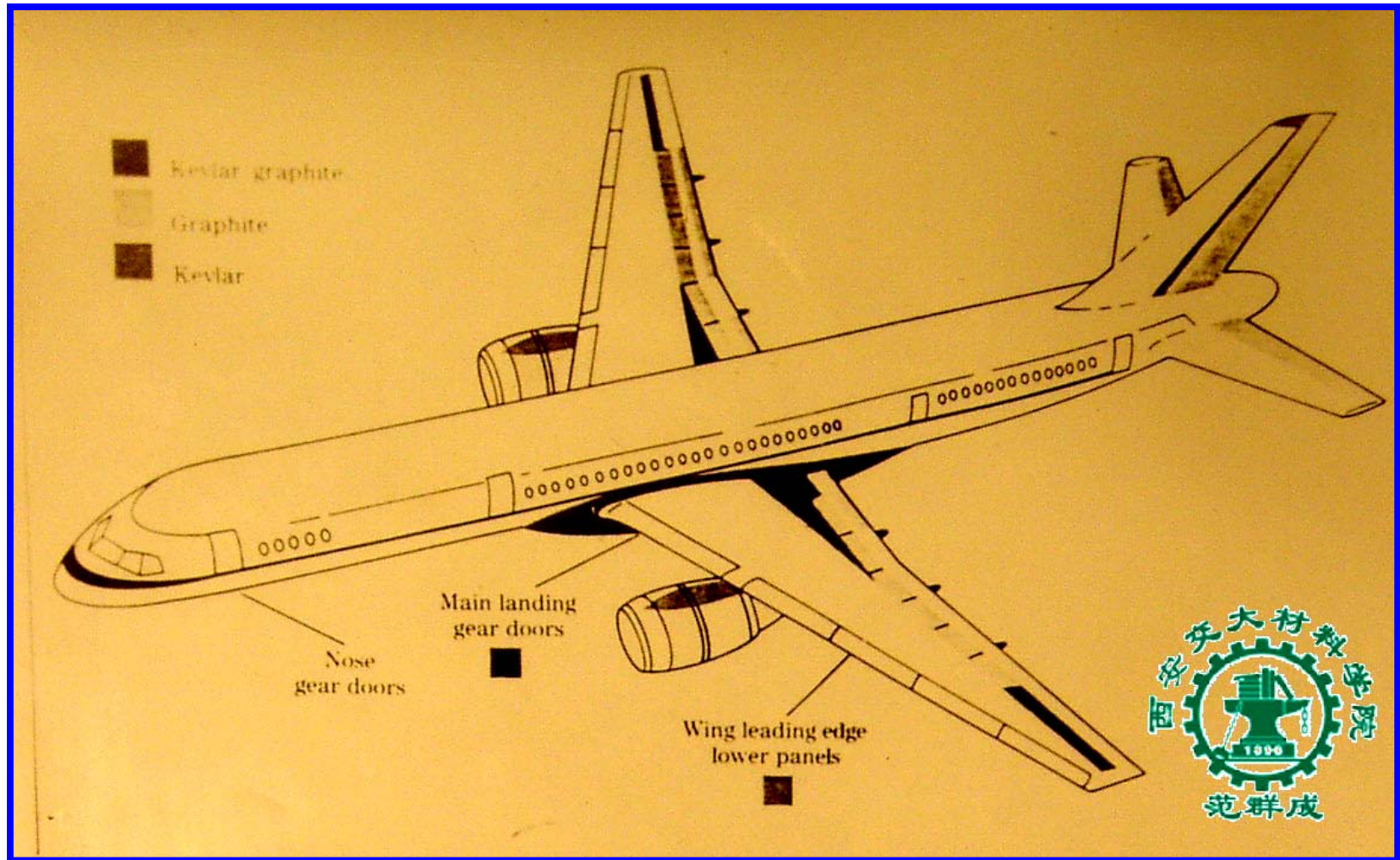


船



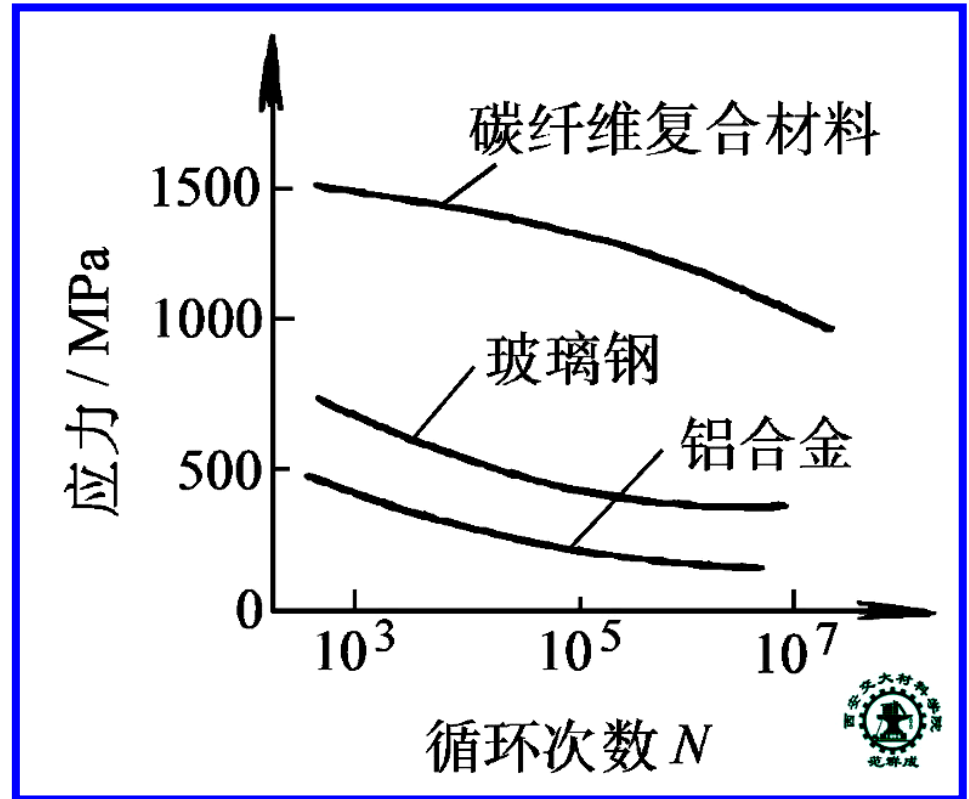
A boat Coated Kevlar Fiber

复合材料在飞机上的应用



2. 抗疲劳和破断安全性好

- 对缺口和应力集中的敏感性小
- 阻止疲劳裂纹扩展或改变裂纹扩展路径



三种材料的疲劳强度比较

3. 高温性能优良

如，用碳纤维增强铝合金后， $\sim 400^{\circ}\text{C}$ 时强度和弹性模量基本不变

4. 减振性能好

- 结构自振频率 \propto 材料比模量的平方根，避免构件共振
- 纤维与基体界面吸收振动能量，使振动很快衰减

第二节 增强材料及其增强机制

一、纤维增强

1. 纤维增强材料

表 9-3 常用增强纤维与金属性能对比

材料 \ 性能	密度 /g·cm ⁻³	抗拉强度 /10 ³ MPa	拉伸模量 /10 ⁵ MPa	比强度 /10 ⁶ N·m·kg ⁻¹	比模量 /10 ⁶ N·m·kg ⁻¹
无碱玻璃纤维	2.55	3.40	0.71	1.33	28
高强度碳纤维(II型)	1.74	2.42	2.16	1.39	124
高模量碳纤维(I型)	2.00	2.23	3.75	1.12	188
Kevlar49	1.44	2.80	1.26	1.94	88
硼纤维	2.36	2.75	3.82	1.17	162
SiC纤维(钨芯)	2.69	3.43	4.80	1.28	178
钢丝	7.74	4.20	2.00	0.54	26
钨丝	19.40	4.10	4.10	0.21	21
钼丝	10.20	2.20	3.60	0.22	35

各类增强纤维



不锈钢纤维

Stainless Steel Fiber

玻璃纤维

Fiberglass

碳纤维

Carbon Fiber



玻
璃
纤
维
布



1. 玻璃纤维

- 高抗拉强度。比块状玻璃高几十倍，比块状高强度合金钢还高
- 弹性模量较高。比其他人造纤维高5~8倍，但比一般金属低很多
- 耐热性较高。软化点为550~580℃，在该温度以下受热时强度不变
- 良好的耐蚀性。除氢氟酸、浓碱、浓磷酸外，对其他溶剂有良好的化学稳定性
- 不吸水，不燃烧，尺寸稳定，隔热，吸声，绝缘，透过电磁波
- 制取方便，价格便宜

2. 碳纤维

- 密度低. $1.33\sim 2.0\text{g/cm}^3$
- 高、低温性能好. 1500°C 以上惰性气体中强度不变, 在 -180°C 脆性也不增加
- 弹性模量高. $2.6\times 10^5\sim 4\times 10^5\text{MPa}$
- 化学稳定性高. 耐浓盐酸、硫酸、苯、磷酸、丙酮
- 热膨胀系数小, 导电, 自润滑性好
- 脆性大, 易氧化

3. 硼纤维

将元素硼用蒸汽沉积的方法沉积到钨丝纤维上

- 高熔点. $\sim 2300^{\circ}\text{C}$
- 高强度. 与玻璃纤维相近
- 弹性模量高. $3.8 \times 10^5 \sim 4.9 \times 10^5 \text{MPa}$
- 良好的抗氧化性和耐腐蚀性
- 比重大, 直径较粗, 生产工艺复杂, 成本高, 价格昂贵

4. 芳纶纤维（Kevlar纤维）

- 高比强度. 小比重 (1.45g/cm^3), 高强度 ($2.8\sim 3.7\text{GPa}$)
- 高比模量. 是玻璃纤维的3倍
- 高韧性. 好于玻璃纤维和碳纤维
- 耐热性好. 好于玻璃纤维, 能在 290°C 下长期使用
- 优良的抗疲劳性、耐腐蚀性、绝缘性和可加工性
- 价格便宜

5. 碳化硅纤维

以钨丝或碳纤维作纤芯，通过气相沉积法而制得；或用聚碳硅烷纺纱，经烧结而制得。

- 优良的高温强度. 1100°C , 2100MPa
- 高熔点, 高模量

2. 颗粒增强材料

- 金属基复合材料中的增强颗粒：

Al_2O_3 SiC Si_3N_4 WC TiC B_4C 石墨

表 9-4 常用颗粒增强物的性能

颗粒名称	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	热膨胀系数/ $10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	硬度/GPa	抗弯强度/MPa	弹性模量/GPa
碳化硅 (SiC)	3.21	2700 (分解)	4.0	75.31	26.5	400~ 500	
碳化硼 (B_4C)	2.52	2450	5.73		29.4	300~ 500	360~ 460
碳化钛 (TiC)	4.29	3300	7.4		25.5	500	
氧化铝 (Al_2O_3)		2050	9.0				
氮化硅 (Si_3N_4)	3.2~3.35	2100 (分解)	2.5~3.2	12.55~29.29	19.0	900	330
莫来石 ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$)	3.17	1850	4.2		31.9	~1200	
硼化钛 (TiB_2)	4.5	2980					

- 聚合物基复合材料中的增强颗粒：

MgO 、 SiO_2 、 MoS_2 、 Fe_2O_3 、石墨、碳黑、白
碳黑(二氧化硅无定形微粉)、云母、高岭土、
膨润土、碳酸钙、滑石粉、空心玻璃微珠...

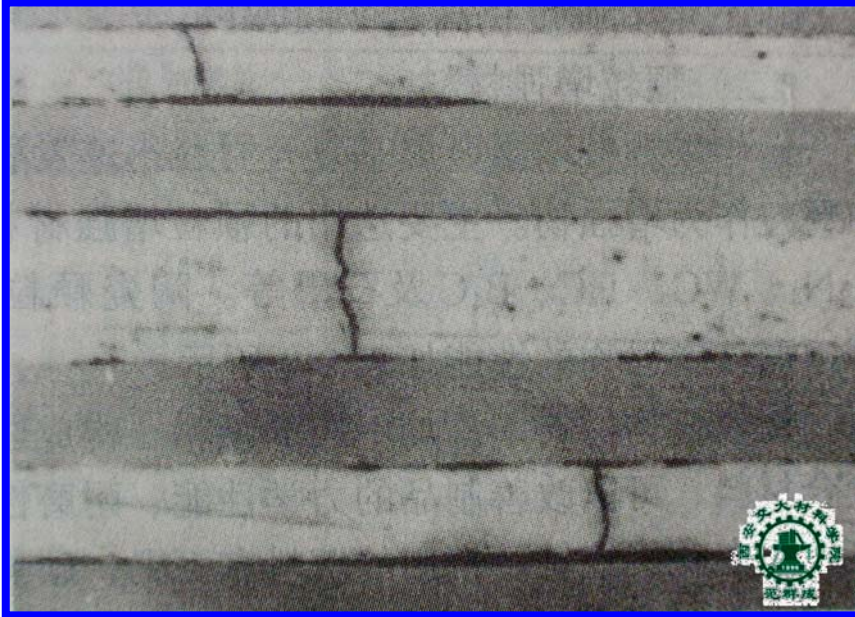
二、增强机制简介

1. 纤维增强

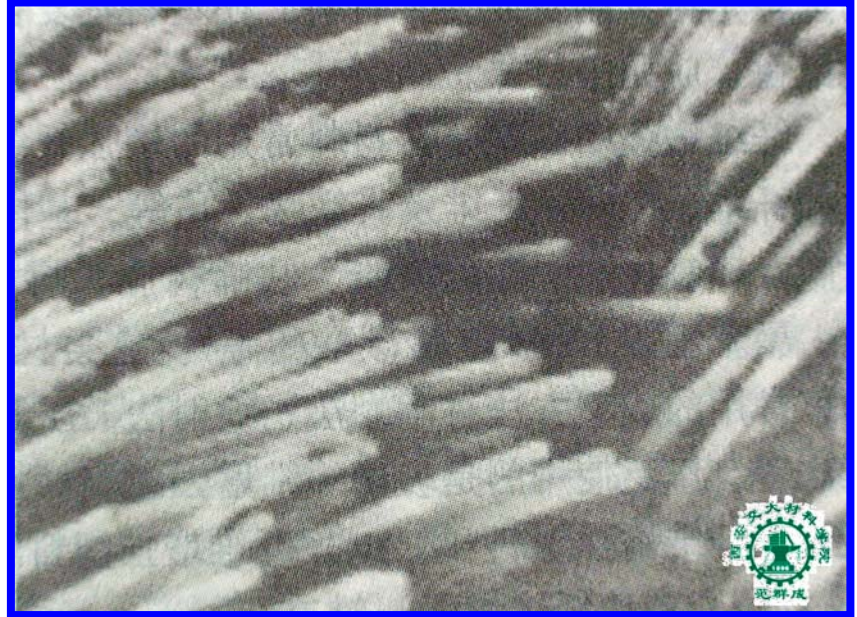
1) 纤维增强机制

- (i) 与块状材料相比，纤维具有更高的强度和韧性
- (ii) 被基体保护的纤维，不易受损伤，受载时不易产生裂纹，使材料承载能力增大
- (iv) 纤维断裂时，基体能阻止裂纹扩展并改变扩展方向
- (iv) 纤维与基体间适当的界面结合强度，使纤维断裂而从基体中难以拔出

THE END



纤维断裂后裂纹沿纤维与基体界面扩展



断裂的纤维被从基体中拔出

2) 纤维增强复合条件

- (i) 纤维的强度和弹性模量应远高于基体
- (ii) 纤维与基体间应有适当的界面结合强度
- (iv) 纤维的排列方向应与构件受力方向一致
- (iv) 纤维与基体的热膨胀系数应匹配
- (v) 纤维与基体之间不应发生使结合强度降低的化学反应
- (vi) 纤维所占体积分数、纤维长度 L 和直径 d 及长径比 L/d 等应满足一定要求

2. 颗粒增强

- 高度弥散分布于基体中的增强颗粒使主要承受载荷的基体的强度得到提高
- 对于金属基体，增强颗粒阻碍基体中位错的运动
- 对于高聚物基体，增强颗粒阻碍基体中分子链的运动
- 增强颗粒直径一般在 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 范围时增强效果最好

第三节 常用复合材料

一、塑料基复合材料

1. 玻璃纤维增强塑料（玻璃钢）

1) 热塑性玻璃钢

- 体积分数为 20%~40% 的玻璃纤维与 60%~80% 的热塑性树脂复合
- 高强度和冲击韧性，良好的低温性能和低热膨胀系数

表 9-5 几种热塑性玻璃钢的性能

性能 基体材料	密度 /g·cm ⁻³	抗拉强度 /MPa	弯曲弹性模量 /10 ² MPa	热膨胀系数 /10 ⁻⁵ ·°C ⁻¹
尼龙 66	1.37	182	91	3.24
ABS	1.28	101.5	77	2.88
聚苯乙烯	1.28	94.5	91	3.42
聚碳酸酯	1.43	129.5	84	2.34

2) 热固性玻璃钢

- 体积分数为 60%~70% 的玻璃纤维与 30%~40% 的热固性树脂复合
- 高强度, 低密度, 耐腐蚀, 绝缘、绝热性好, 吸水性低, 防磁, 微波穿透性好, 易加工成形
- 弹性模量及耐热性仍不如钢

表 9-6 几种热固性玻璃钢的性能

性能 基体材料	密度 /g·cm ⁻³	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /10 ² MPa	抗弯强度 /MPa
聚酯	1.7~1.9	180~350	210~250	210~350
环氧	1.8~2.0	70.3~298.5	180~300	70.3~470
酚醛	1.6~1.85	70~280	100~270	270~1100

3) 玻璃钢的应用

用于制造 { 要求自重轻的受力构件
 { 要求无磁性、绝缘、耐腐蚀的零件

航天航空工业：雷达罩，直升机机身，飞机螺旋桨，发动机叶轮，火箭导弹发动机壳体和燃料箱...

船舶工业：轻型船、艇、舰，扫雷艇...

车辆工业：汽车、机车、拖拉机车身，发动机机罩...

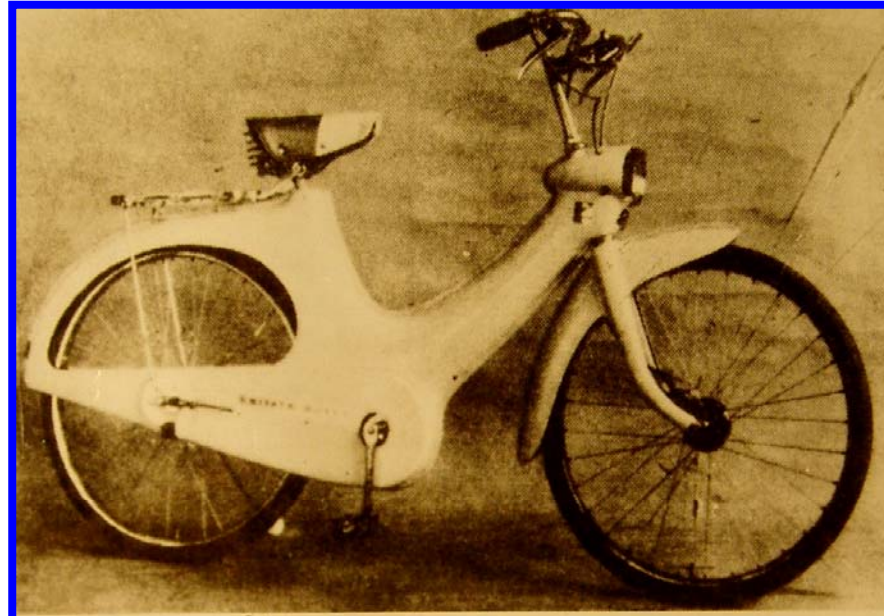
电机电器工业：重型发电机护环，大型变压器线圈绝缘桶，各种绝缘零件...

石油化工工业：代替不锈钢制作耐酸、耐碱、耐油的容器、管道、反应釜...



玻璃纤维增强尼龙车轮

Tuff Wheel Made of Glass



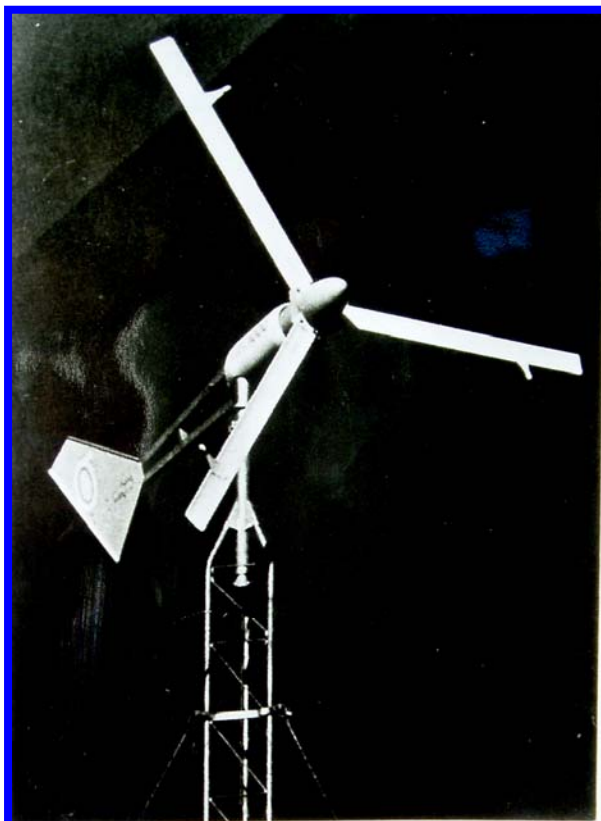
玻璃纤维增强
塑料制自行车

Bicycle Manufactured by Glass



玻
璃
钢
制
冷
却
塔





玻璃纤维增强
风机叶片

Fiberglass Composite

Turbine Blades



防 弹



2. 碳纤维增强塑料

- 性能优于玻璃钢
- 低密度, 高强度, 高弹性模量, 高比强度, 高比模量, 优良的抗疲劳性能、耐冲击性能、自润滑性、减磨耐磨性、耐腐蚀性、耐热性
- 碳纤维与基体结合力低, 各向异性严重

航天航空工业: 飞机机身, 螺旋桨, 尾翼, 发动机风扇叶片, 卫星壳体, 航天飞行器外表面隔热层...

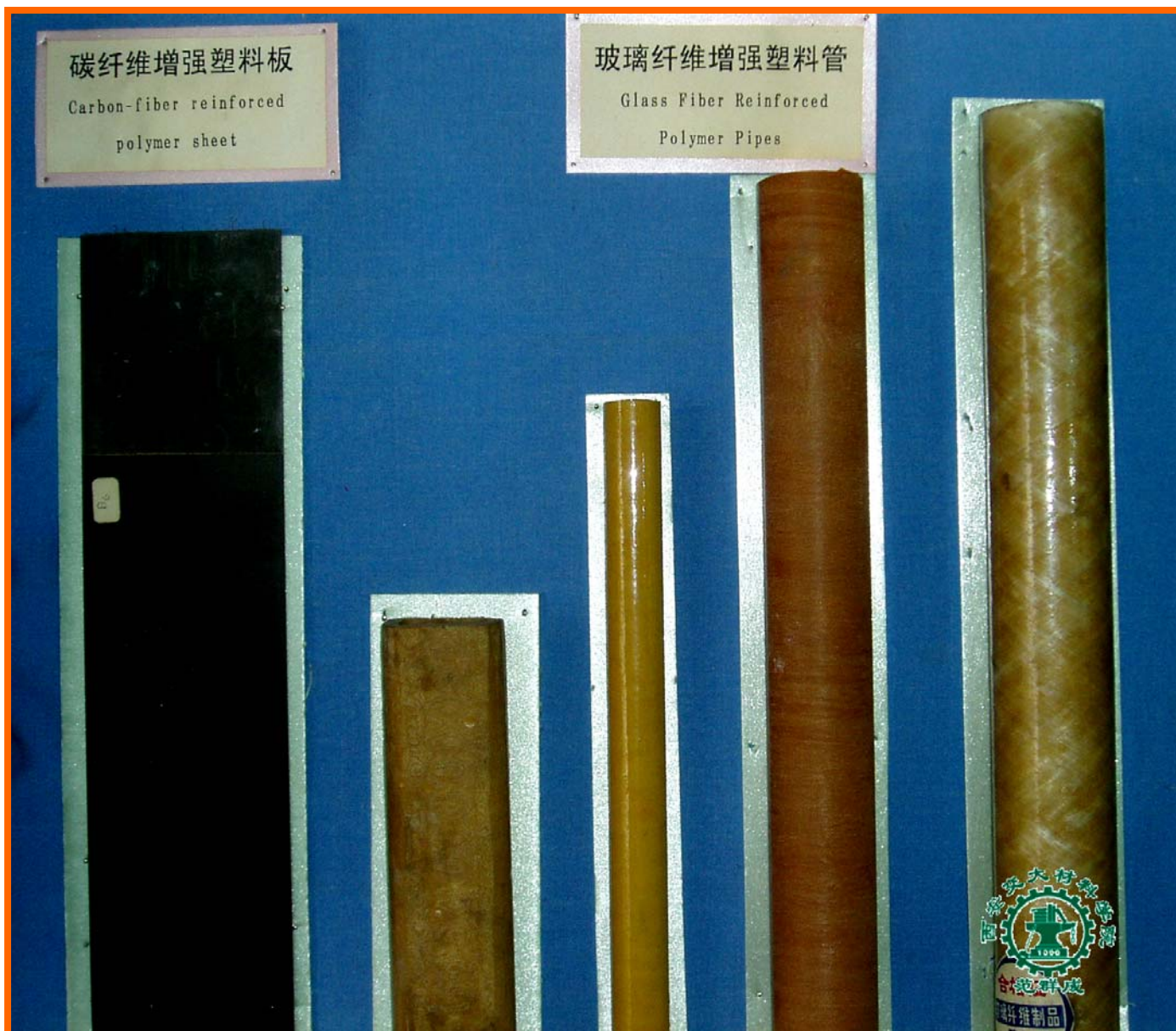
机器制造业: 轴承, 齿轮, 磨床磨头, 齿轮旋转刀具...

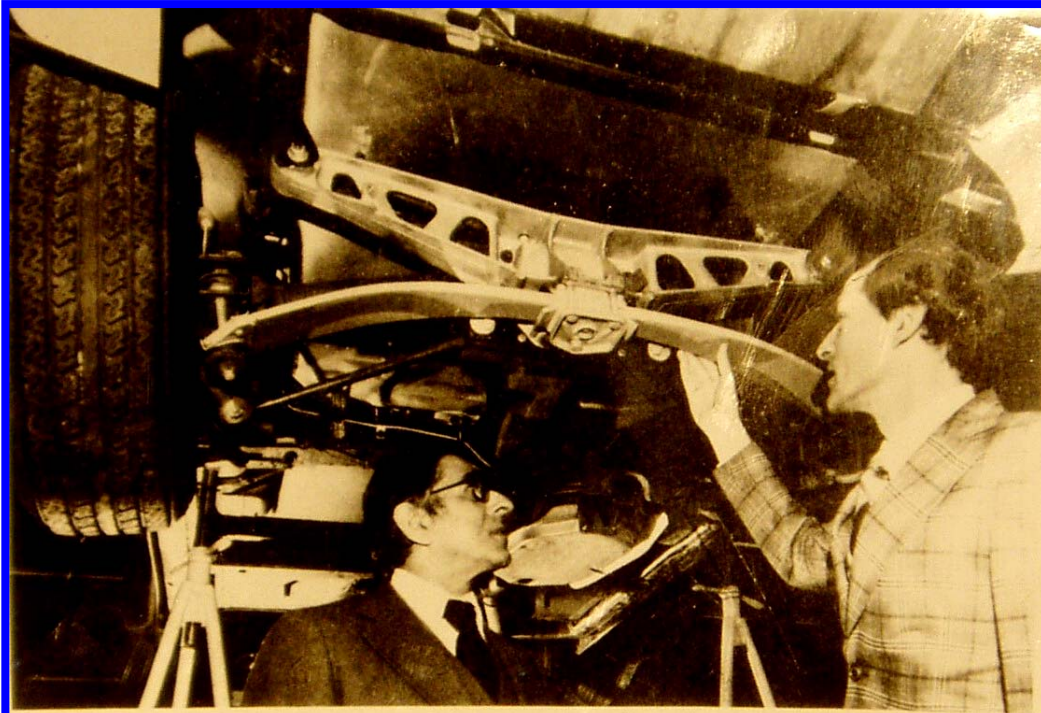
电机工业: 大功率发电机护环...

化学工业: 管道, 容器...

THE END

玻
璃
钢
管
和
玻
璃
钢
板





碳纤维增强弹簧板

Carbon Reinforced Composite

Spring-Weigh about 60% 1

than Steel That



3. 硼纤维增强塑料

- 高比强度、比模量，良好的耐热性
- 各向异性明显，加工困难，成本高
- 主要用于航天航空工业中要求高刚度的结构件，如飞机机身机翼轨道飞行器隔离装置结合器...

4. 碳化硅纤维增强塑料

- 高比强度、比模量
- 主要用于宇航器上的结构件，飞机的门、降落传动装置箱、机翼...

THE END

5. Kevlar 纤维增强塑料

- 抗拉强度高于玻璃钢，与碳纤维—环氧树脂复合材料相近
- 延性好，与金属相近
- 抗耐冲击性超过碳纤维增强塑料
- 优良的疲劳抗力和减振性
- 主要用于：飞机机身，雷达天线罩，火箭发动机外壳，轻型船舰，快艇...

二、金属基复合材料

1. 纤维增强金属基复合材料

1) 硼纤维增强铝基复合材料

- 高抗拉、压、剪切、疲劳强度
- 主要用于：飞机或航天器蒙皮、大型壁板、长梁、加强肋，航空发动机叶片...

2) 碳纤维增强铝基复合材料

- 高比强度、比模量，高温强度高，减摩性和导电性好

- 主要用于：航天飞机外壳运载火箭的大直径圆锥段级间段接合器油箱，飞机蒙皮、螺旋桨涡轮发动机的压气机叶片，重返大气层运载工具的防护罩，汽车发动机零件（如活，汽缸头等），滑动轴承...

3) 碳化硅纤维增强铝基复合材料

- 高比强度、比模量，高硬度
- 主要用于：飞机机身结构件，汽车发动机活塞、连杆等

2. 颗粒增强金属基复合材料

1) 金属陶瓷（前已讲过）

2) 弥散强化合金

将少量（体积分数通常小于20%）的颗粒尺寸极细的增强微粒高度弥散地均匀分布在金属基体中。常用的增强相是高抗拉、压、剪切、疲劳强度

- 常用的增强相： Al_2O_3 ThO_2 MgO BeO
- 常用基体金属： Al Cu Ti Cr Ni

(1) 弥散强化铝（烧结铝）

- 先将片状铝粉的表面氧化成 Al_2O_3 薄膜，再经压制、烧结、挤压
- 高温强度高
- 主要制作：飞机的结构件（如机翼，机身），飞机发动机压气机叶轮、高温活塞，大功率柴油机活塞，冷却反应堆中核燃料元件的包套材料

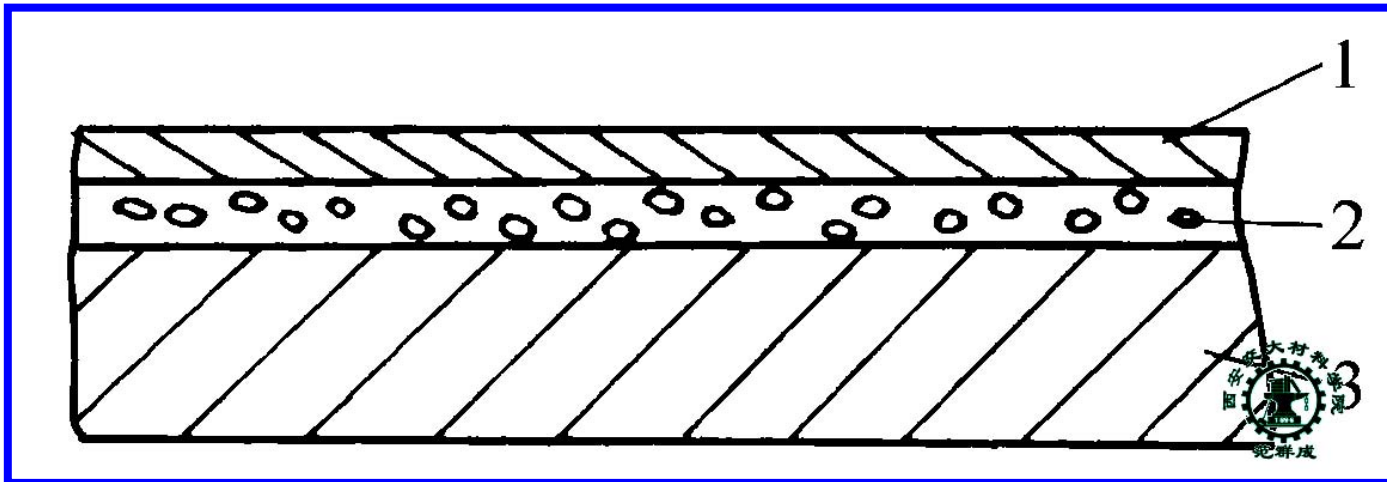
(2) 弥散强化铜

- 先制成 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 合金粉，再热挤或锻造
- 既有良好导电性，又有良好的高温强度
- 主要制作：高温下的导热、导电体，如电焊机的电极，大功率电子管的电极...

THE END

3. 塑料—金属多层复合材料

- 塑料层：聚四氟乙烯或聚甲醛，自润滑
- 主要用作：高应力（140MPa）、高温（270℃）及低温（-195℃）下的无油润滑滑动轴承



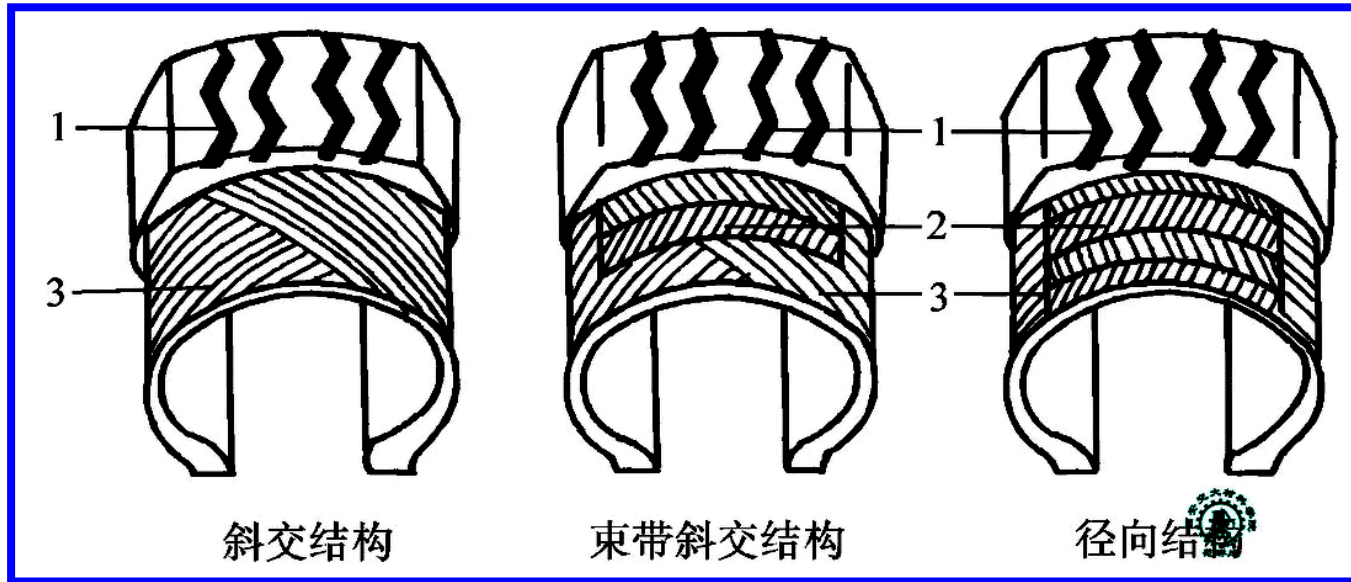
塑料-金属三层复合材料 1—塑料层0.05~0.3mm
2—多孔性青铜中间层0.2~0.3mm 3—钢基体

THE END

三、橡胶基复合材料

1. 纤维增强橡胶

- 常用纤维：天然纤维，合成纤维（如尼龙，涤纶，维尼纶），玻璃纤维，金属丝
- 主要用于：轮胎，传动带，橡胶管，橡胶布



汽车轮胎的结构示意图

1—胎面层 2—缓冲层 3—胎体帘布层

THE END



2. 粒子增强橡胶

- 补强剂：碳黑, 白炭黑, 氧化锌, 活性碳酸钙

表 9-7 炭黑对橡胶的增强效果

橡胶类别	硫化后的抗拉强度/MPa		增强效果 加炭黑强度/未加炭黑强度
	未加炭黑	加炭黑	
天然橡胶	20~30	30~34.5	1~1.6
氯丁橡胶	15~20	20~28	1~1.8
丁苯橡胶	2~3	15~25	5~12
丁腈橡胶	2~4	15~25	4~12

四、陶瓷基复合材料

主要是提高陶瓷的韧性

1. 纤维增强陶瓷基复合材料

- 常用纤维：碳纤维， Al_2O_3 纤维，SiC纤维，金属纤维

表 9-8 陶瓷经碳化硅纤维增强前后的性能比较

材料	抗弯强度 /MPa	断裂韧度 /MPa·m ^{1/2}	材料	抗弯强度 /MPa	断裂韧度 /MPa·m ^{1/2}
Al_2O_3	550	5.5	玻璃-陶瓷	200	2.0
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$	790	8.8	玻璃-陶瓷/ SiC	830	17.6
SiC	495	4.4	Si_3N_4 (热压)	470	4.4
SiC/ SiC	750	25.0	Si_3N_4 /SiC	800	56.0
ZrO	250	5.0	玻璃	62	1.1
ZrO/ SiC	450	22	玻璃/ SiC	825	17.6

2. 粒子增强陶瓷基复合材料

- 常用粒子: TiC , ZrB_2 , SiC , ZrO_2

表 9-9 莫来石- ZrO_2 复合材料性能

样品	热压烧结	m- ZrO_2 φ_{ZrO_2} (%)	σ_f / MPa		K_{IC} / ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	
			室温	800°C	室温	800°C
莫来石 ^①	1650°C 60min	0	236	274	2.5	3.1
复合物 ^②	1480°C 80min	88.1	612	440	5.1	4.4

① 莫来石: $\text{Al/Si} = 68/32$ (质量比)

② ZrO_2 : ($\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$): 莫来石=25:25:50 (体积比)