

复合材料原理



江苏大学材料学院

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

2.6 复合材料界面及其改性

- ❖ 界面的基本概念
- ❖ 聚合物基复合材料的界面改性
- ❖ 金属基复合材料的界面及其改性方法
- ❖ 层状复合材料的界面

思考题

- 1、你认为铜-铝复合材料的界面结合存在哪些问题，如何加以解决？
- 2、陶瓷层状复合材料应用的最大障碍是什么，通过哪些技术途径可以推动该类材料的应用？

界面金属间化合物、氧化，复合温度控制、气体保护等。

制备工艺复杂（烧结难）、成本高，烧结助剂、纳米粉体、开发新工艺等。

2.7 复合材料界面表征

- ❖ 界面形态及界面层结构的表征
- ❖ 界面结合强度的表征
- ❖ 界面残余应力的表征
- ❖ 增强体表面性能的表征

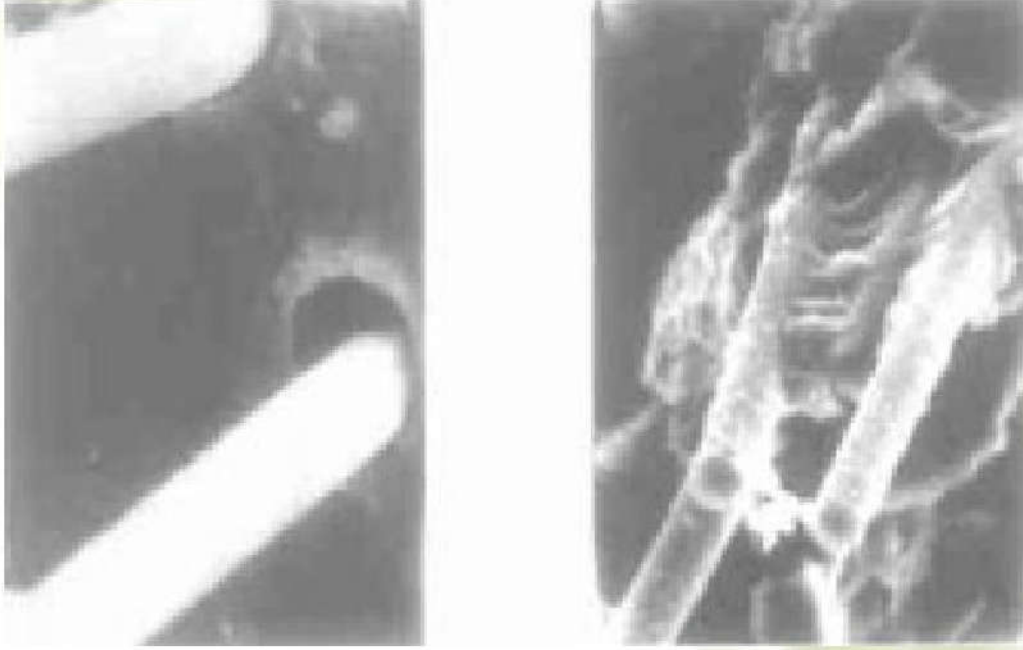


图1 纤维增强复合材料界面的扫描电镜照片（后者玻纤经稀酸处理）

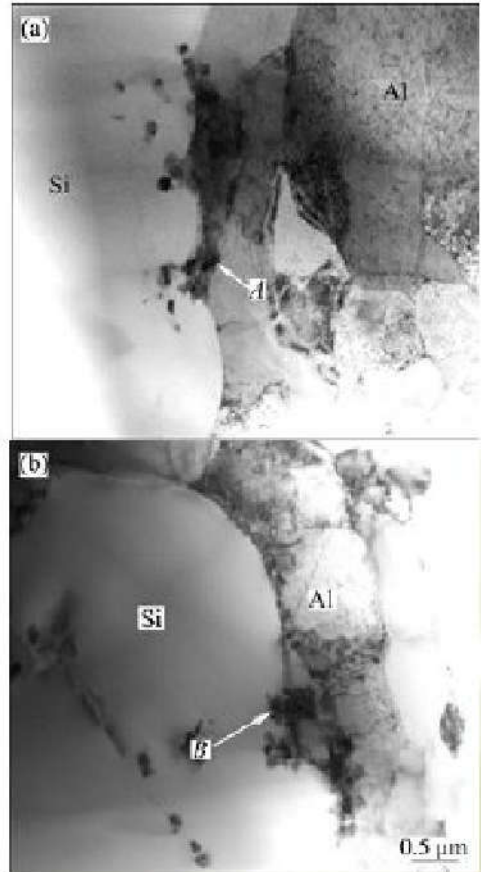


图2 透射电子显微镜（TEM）及复合材料界面形态照片

表1 界面层厚度与CF/PMR-15的界面剪切强度的关系

碳纤维表面处理条件	界面相对厚度/nm	ILSS/MPa
未处理	2.0~3.0	41.4~42.7
空气等离子体处理	4.1~5.0	91.0~94.2
接枝NA酸酐	6.0~8.0	100.5~101.7

聚酰亚胺树脂PMR: ①在宽广的温度范围内保持高的强度。②高的热稳定性和氧化稳定性。③优良的磨蚀特性。④优良的电性能，在高温下电性能基本保持恒定。⑤具有自熄性能，发烟量小。

- ❖ 采用**Raman光谱**方法可以表征聚合物基复合材料的界面层结构。
- ❖ 通过增多扫描次数和改变激光波长，可以研究碳纤维/线型聚合物复合材料界面的近程结构。
- ❖ CF/**PEEK**是研究得比较多的模型体系。

PEEK，聚醚醚酮，是一种耐高温、耐化学试剂和强韧性优异的特种高分子材料，已在很多领域得到应用。

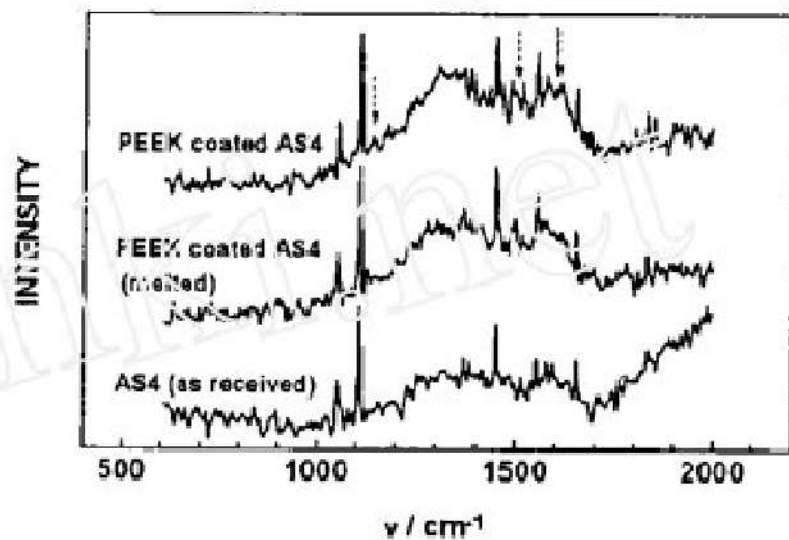


图3 Raman光谱仪及其获得的AS4碳纤维谱图

界面结合强度的表征

- ❖ 复合材料界面强度的原位测定法
- ❖ 声显微技术
- ❖ 单纤维拔出测试法
- ❖ 声发射技术
- ❖ 扫描电镜下动态加载断裂测量
- ❖ 扭辫分析表征界面效应
- ❖ 宏观测试技术

- ❖ **界面脱粘方法**在显微镜下采用金刚石探针对复合材料中选定的单根纤维的端部施加轴向载荷，使该纤维在一定深度内与周围基体脱粘。
- ❖ 记录发生脱粘时的压力 P_d ，建立以纤维中心为对称轴的纤维、基体、复合材料的微观力学模型。
- ❖ 通过有限元分析，计算出无限靠近纤维表面的基体中的最大剪切应力，即的出纤维与基体间的界面剪切强度。

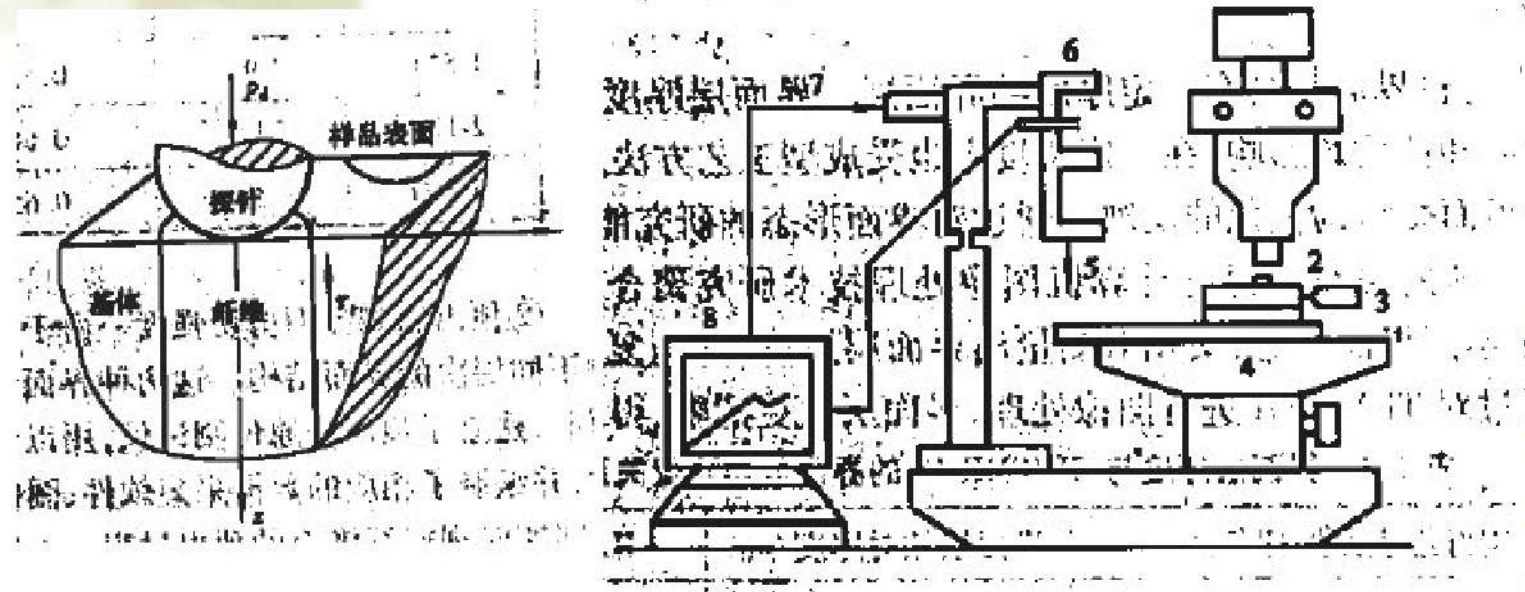


图4 界面脱粘方法测试原理

表2 CF/PMR-15复合材料的性能

碳纤维表面处理条件	界面剪切强度/MPa	层间剪切强度/MPa
未处理	43.5	50.1
空气等离子体处理	54.3	62.7
接枝NA酸酐	121.3	106.0

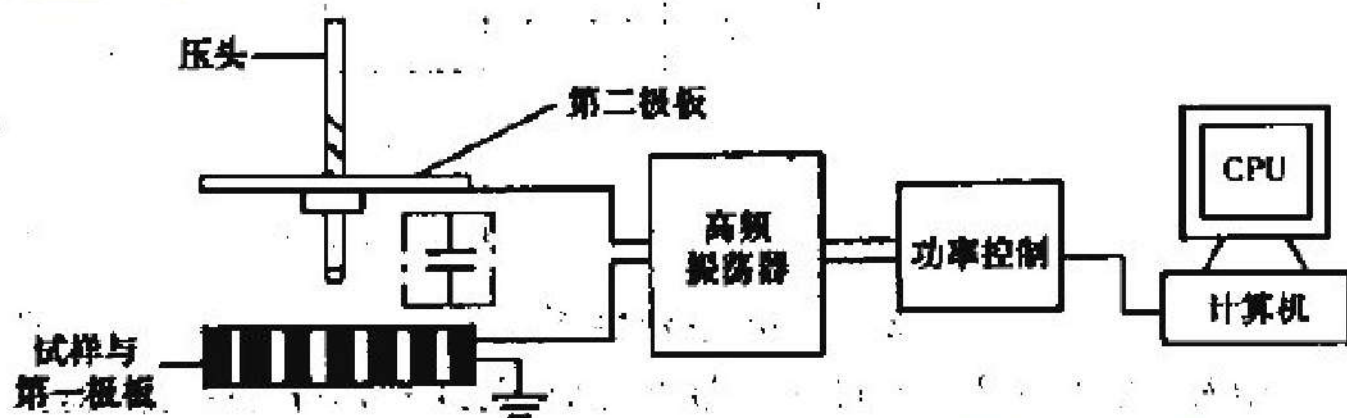


图5 纤维位移测试原理

- ❖ **声学显微镜C-SAM**，也叫扫描声波显微镜、声扫描显微镜、扫描声学显微镜或超声波扫描显微镜。
- ❖ 超声波在行经介质时，若遇到不同密度或弹性系数的物质时，即会产生反射回波。
- ❖ 反射回波强度会因材料密度不同而有所差异，**C-SAM**即最利用此特性来检出材料内部的缺陷，并依所接收讯号的变化成像。
- ❖ 只要被检测试样内部有脱层、气孔、裂缝...等缺陷时，即可由**C-SAM**影像得知其相对位置。
- ❖ 不仅可以观察光学不透明材料的表面、亚表面的状态和性质，而且可以观测材料内部的结构和性质，为非破坏性观察。

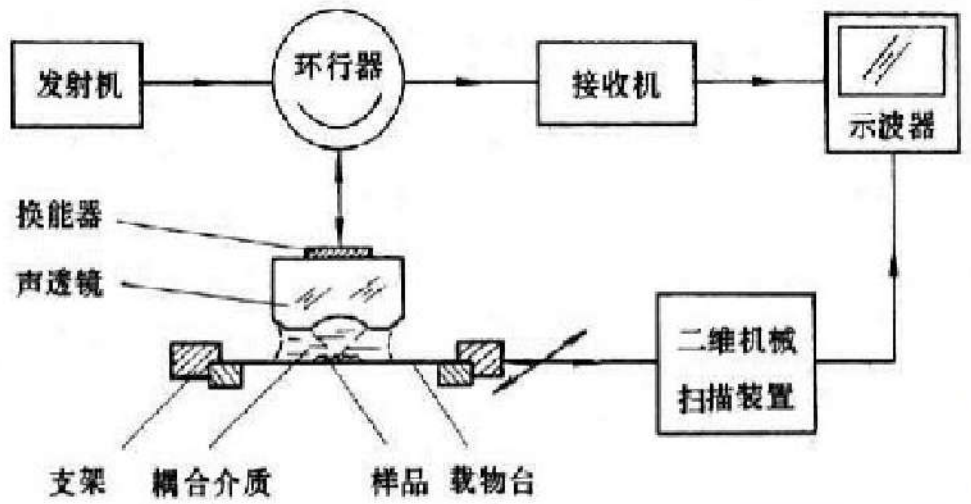


图6 声学显微镜及其原理

- ❖ **单纤维拔出测试法**是增强纤维改性效果和复合材料界面质量评
- ❖ 一分复杂。

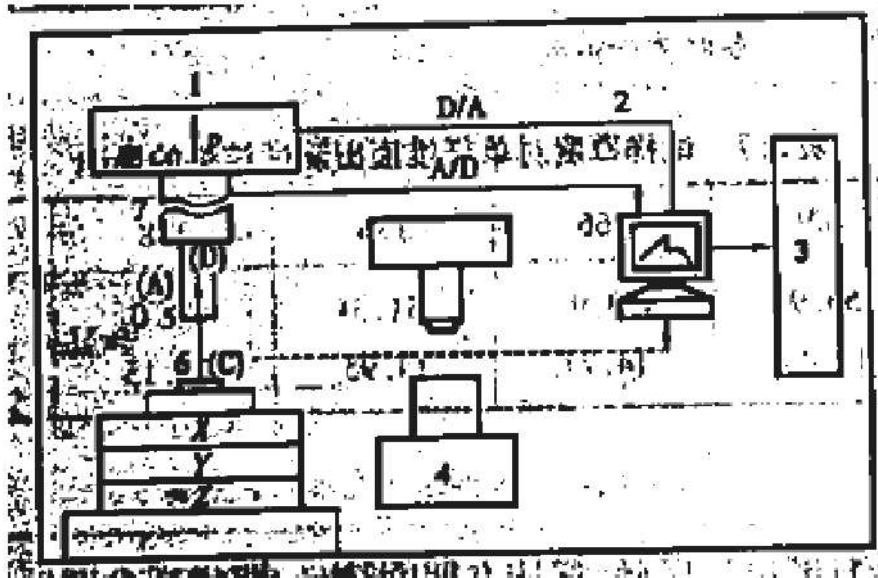


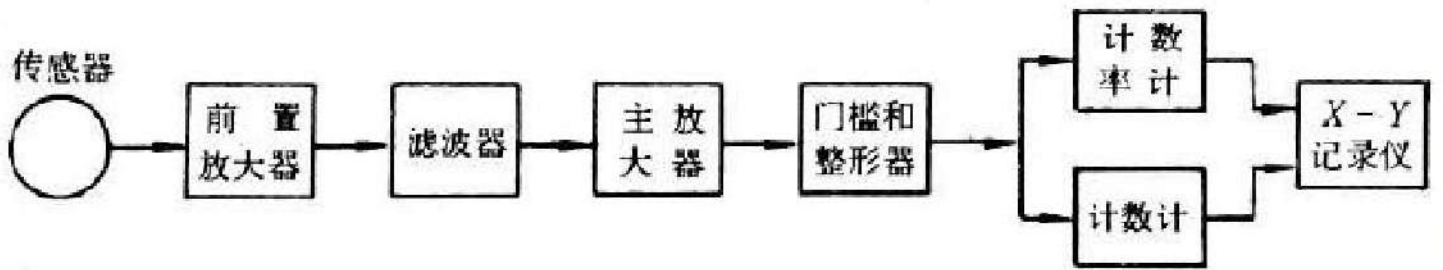
图7 单纤维拔出测试法原理

- ❖ 通过声发射技术，确定复合材料中纤维的断裂位置，从而确定纤维断裂段的长度。
- ❖ 复合材料的界面剪切强度 τ 可以表示为

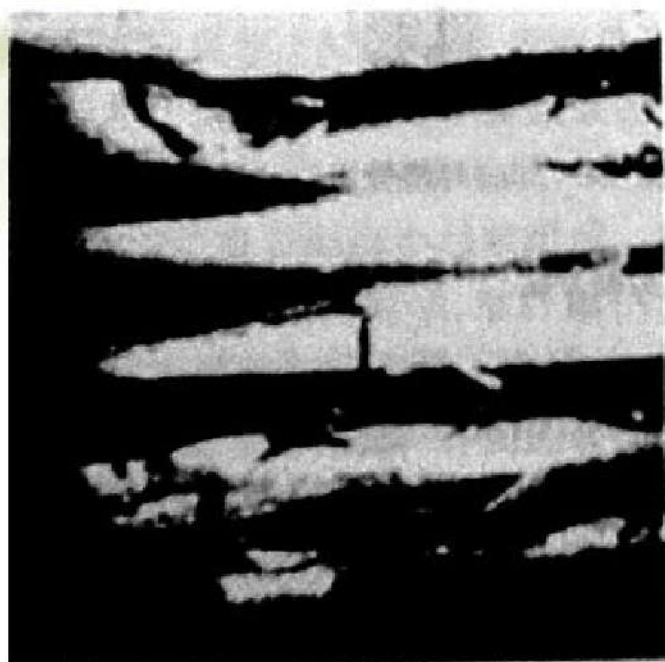
$$\tau = Kd\sigma / (2L)$$

式中， d 为纤维的直径； σ 为纤维的断裂强度； L 为实际测量出的最小断裂长度的平均值； $K=0.75$ 。

- ❖ 可以准确地测量纤维断裂总次数和纤维多次断裂数及断裂纤维的长度，结合力学实验可以确定界面强度和纤维的断裂强度。



单通道声发射仪方框图



(a) CF未经处理



(b) 接枝NA酸酐

图8 CF/PMR扫描电镜下动态拉伸照片

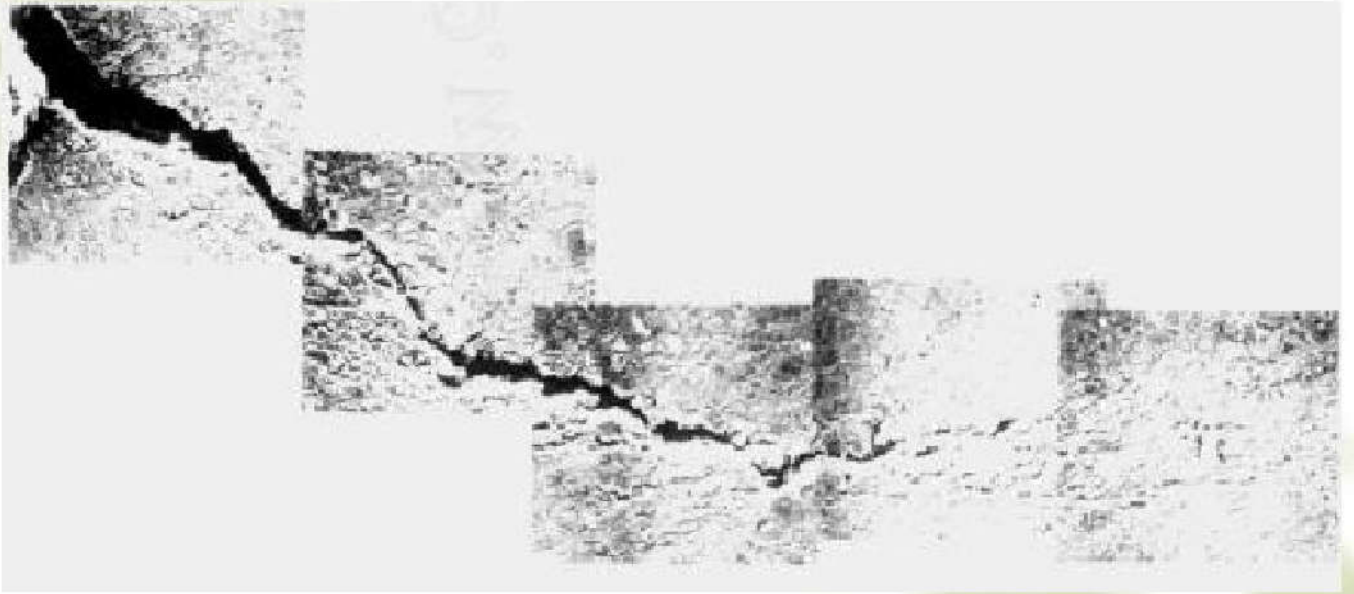


图9 SiC_p/Al复合材料扫描电镜下动态拉伸照片

扭辫分析(torsional braid analysis)

- ❖ 测量物质在扭转振动负荷下的动态模量及力学损耗与温度关系的技术，使用样品最少、测量灵敏度高。
- ❖ 支撑体辫子的表面为惰性时不会影响测量结果，但是当表面对被测物表现出活性时则会影响测试结果。
- ❖ 适用于高分子材料及聚合物基复合材料，可反映界面结合情况。
- ❖ 将被测样品制成5%~10%的溶液或将它熔化，然后浸渍在一条由几千根单丝（通常用玻璃纤维）编成的惰性辫子上，将溶剂除去或使熔体凝固后，即得到由被测材料和惰性辫子组成的复合试样。
- ❖ 可以在所有力学状态（玻璃态、橡胶态或粘流态）下对材料进行试验。



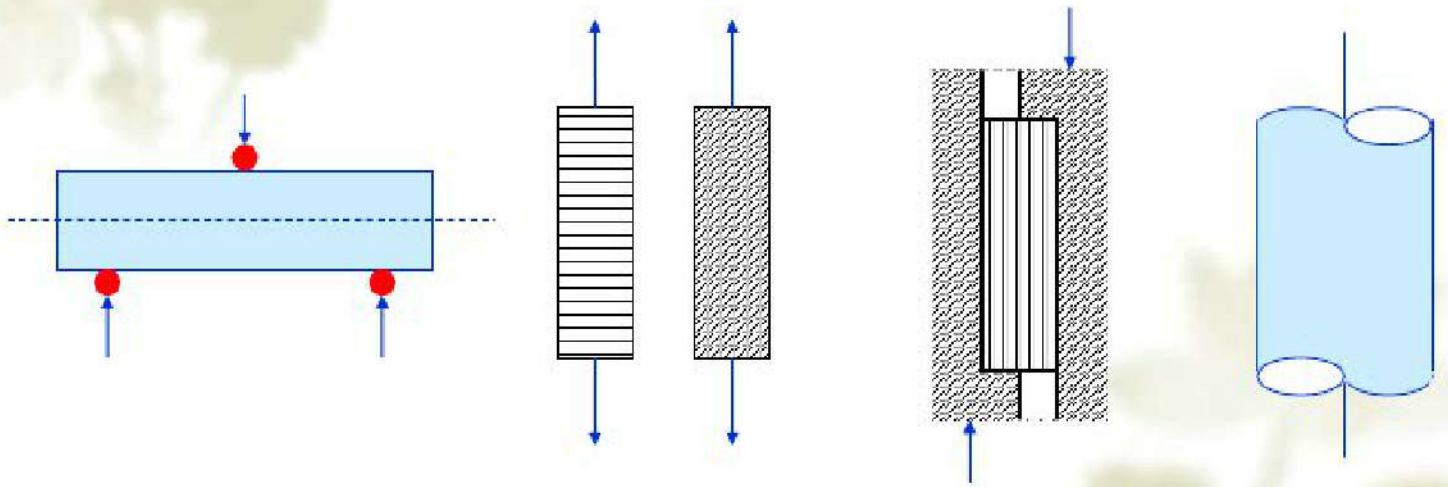


图10 几种宏观测试方法

- ❖ **宏观实验**得到的强度是界面、基体和增强体共同受力情况下在材料最薄弱环节破坏时的强度。
- ❖ 所得到的强度还与增强体的体积分数、分布，增强体、基体的性质，以及复合材料中的缺陷数量、分布等因素有关。
- ❖ 宏观实验只能得到复合材料的总体强度，虽与复合材料的界面结合强度有一定的联系，但无法得到独立的界面强度。

界面残余应力的表征

界面的残余应力的由来？

- ❖ 界面残余应力的表征是比较困难的，测量的方法主要有**X射线衍射法**和**中子衍射法**。
- ❖ 由于中子源的限制，中子衍射法的应用还受到很大的限制。
- ❖ X射线的穿透能力有限，X射线衍射法只能测定试样表面的残余应力。
- ❖ 可以采用**同步辐射连续X射线能量色散法**测定复合材料界面附近的应力和应变变化。
- ❖ 该方法兼有较好的穿透性和对残余应变梯度的高空间分辨率，可以测量界面附近急剧变化的残余应力。

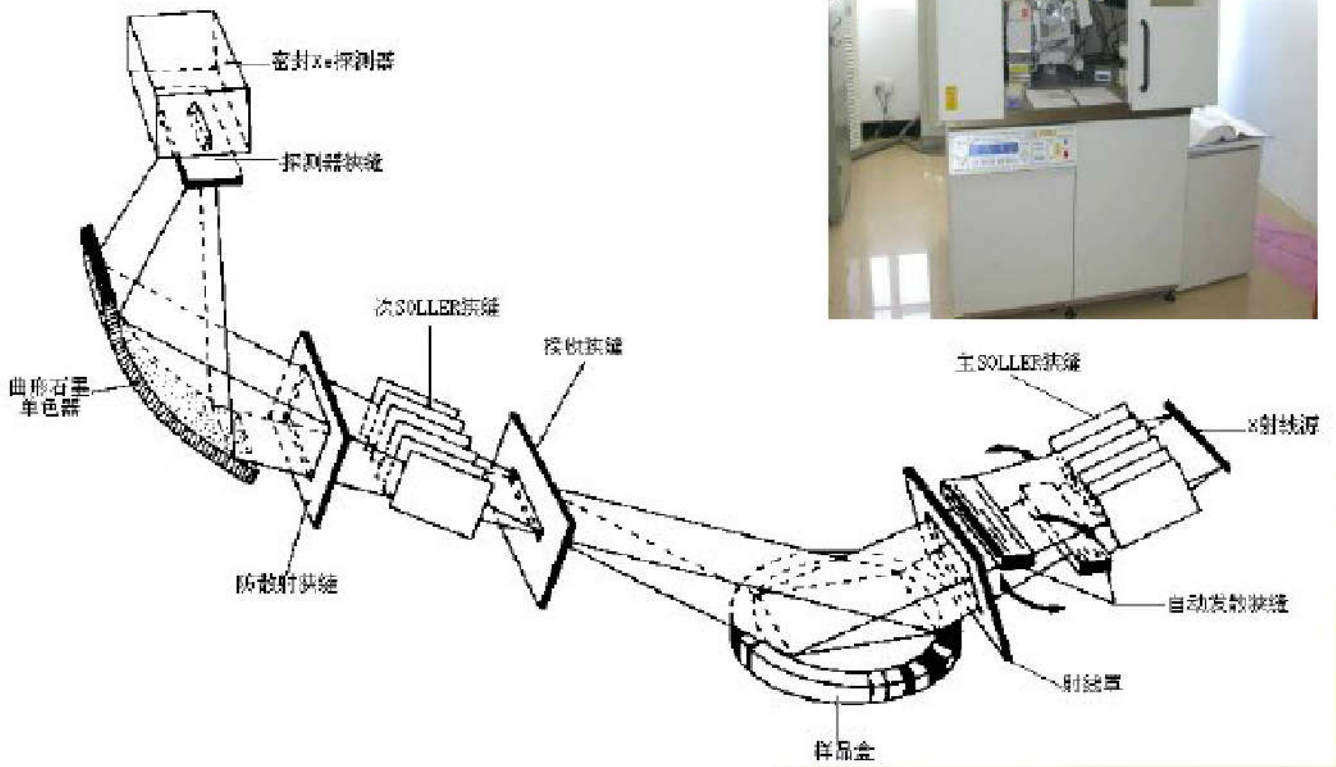


图11 X 射线衍射仪及残余应力测量原理

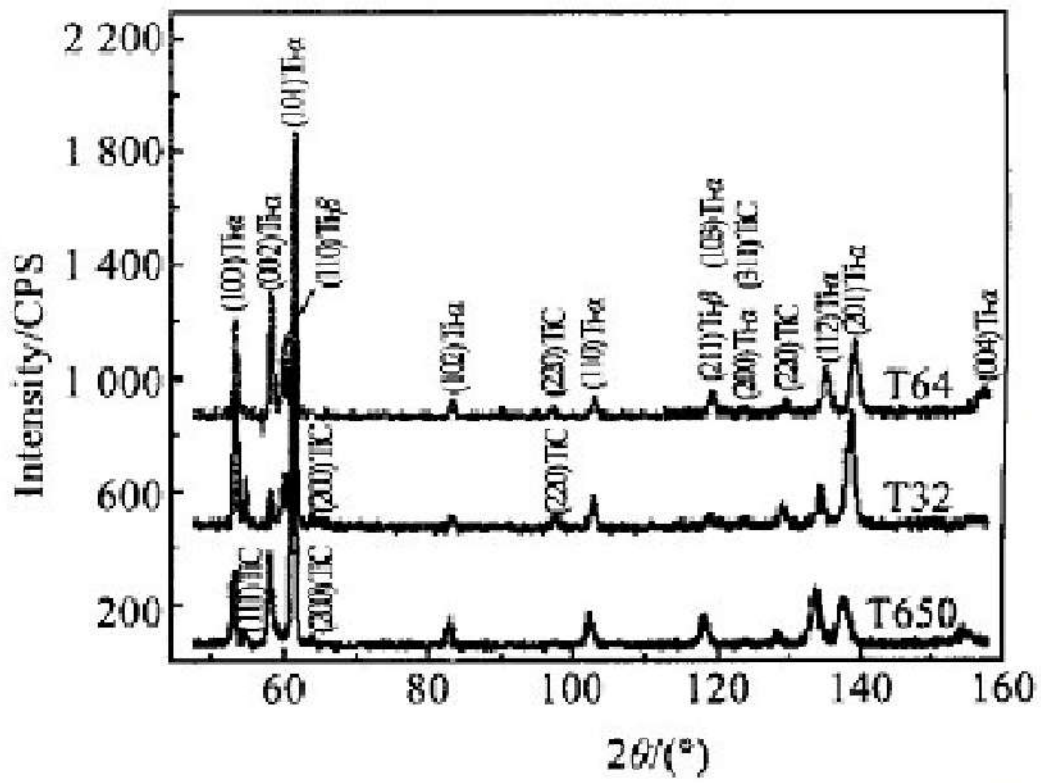


图12 TiC/Ti复合材料的X射线衍射谱



图13 同步辐射装置照片

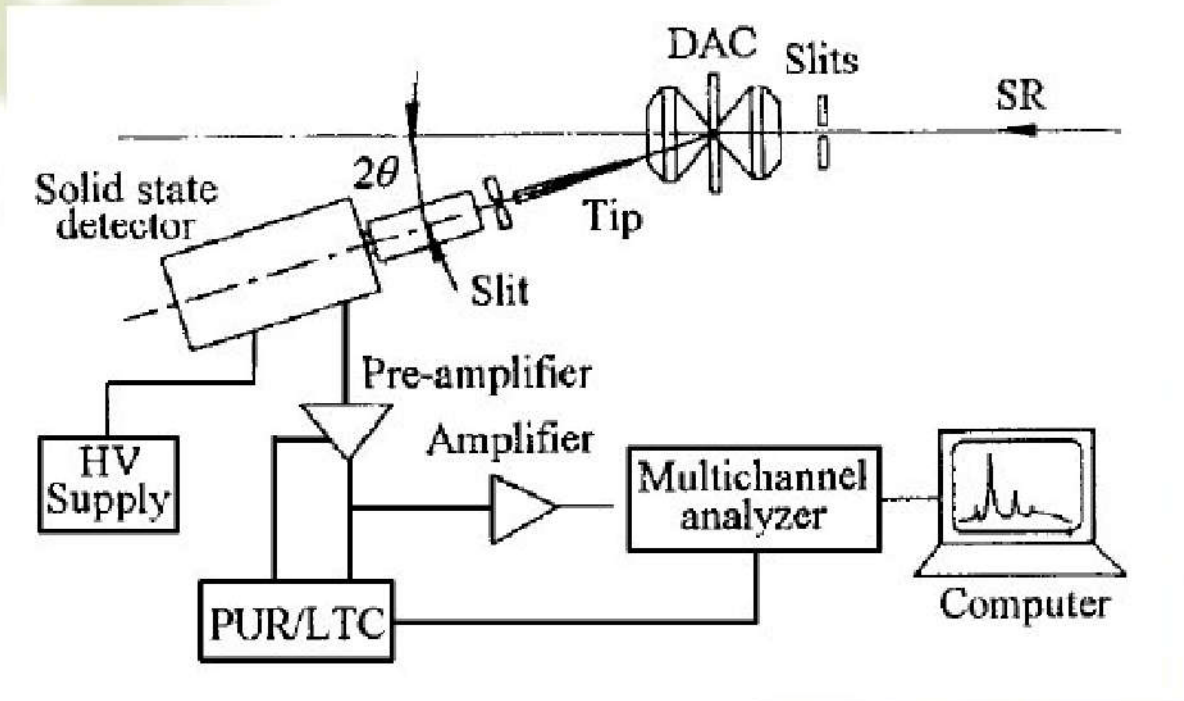


图14 同步辐射连续X射线能量色散法原理

增强体表面性能的特征

- ❖ 增强体的表面直接关系到复合材料的界面，因此对增强体表面进行表征非常必要。
- ❖ 通过**X光电子能谱**（XPS），可以为增强材料表面改性前后的组成、结构和性能变化以及表面改性机理的研究提供科学手段。
- ❖ **扫描隧道显微镜**（STM）可以得到实际空间的真实像，制样简单，并可以在大气条件下直接观测，但样品需要导电。
- ❖ **表面力显微镜**（IFM）即扫描探测显微镜，可以直接测试亚接触和接触间力的信息。



图15 X光电子能谱仪

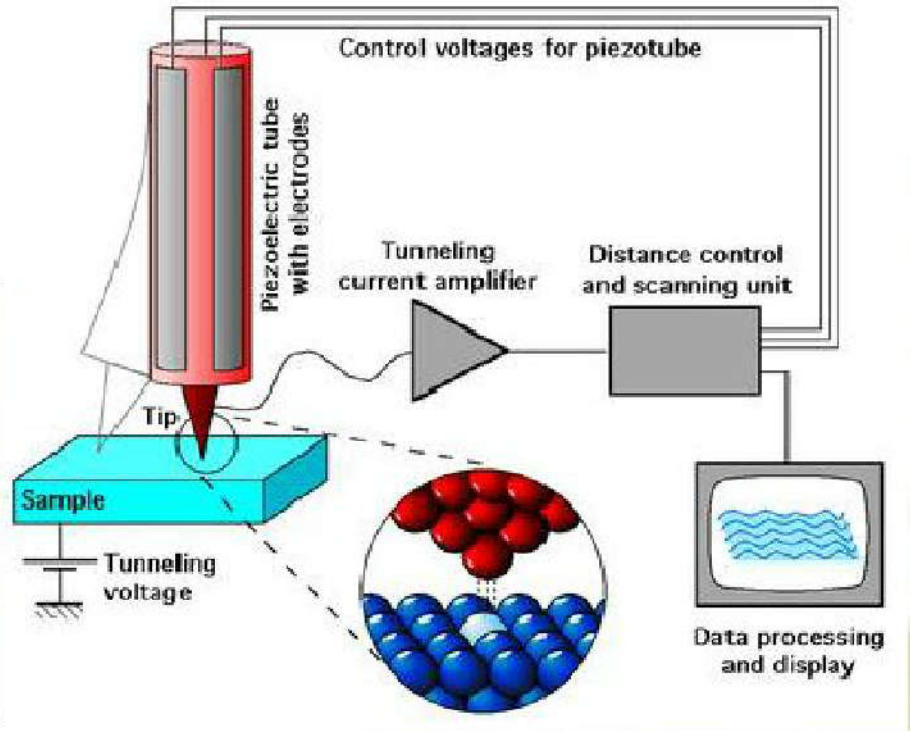


图16 扫描隧道显微镜及其原理

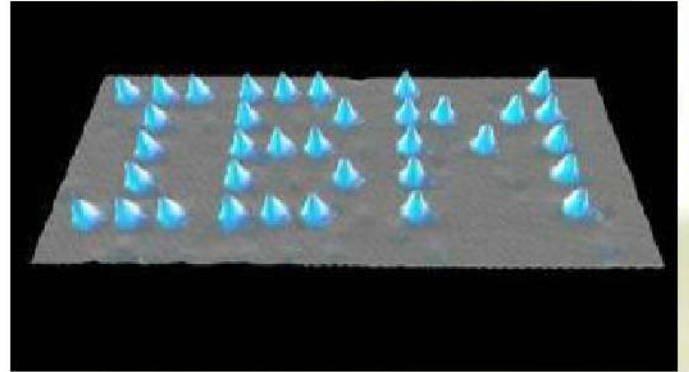
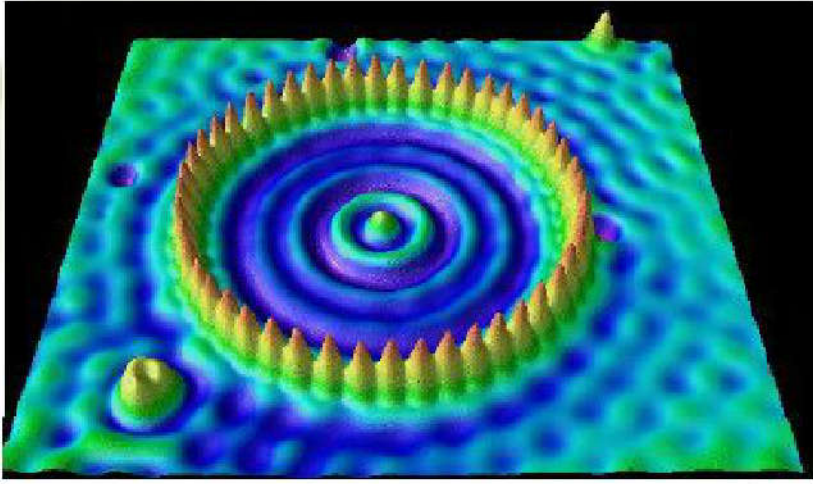


图17 扫描隧道显微镜照(48个铜原子)

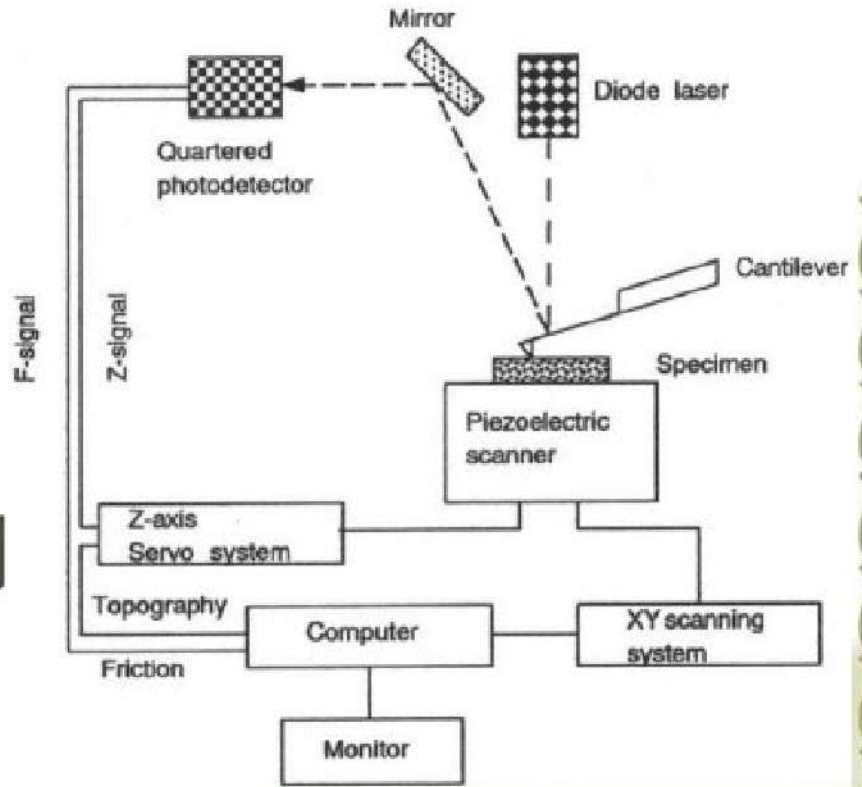
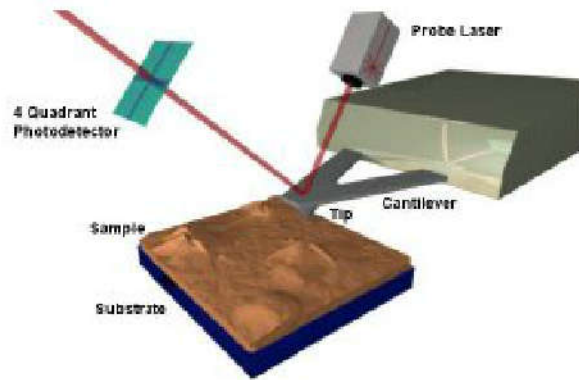
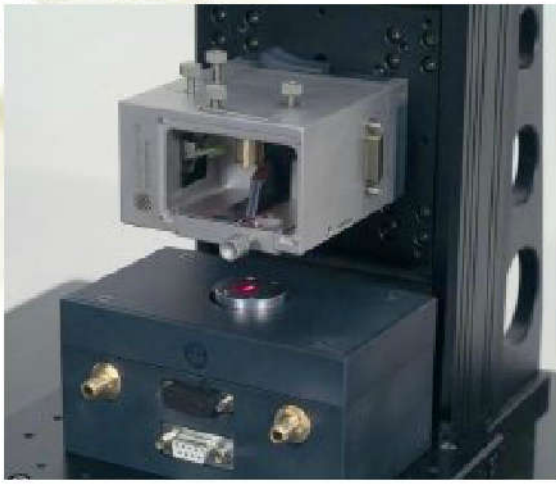
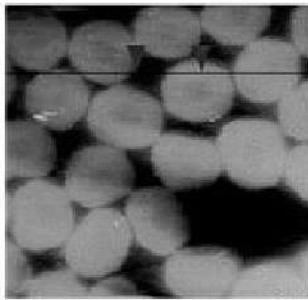
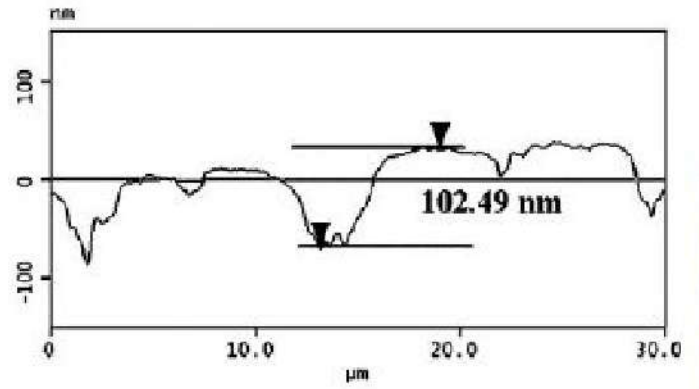
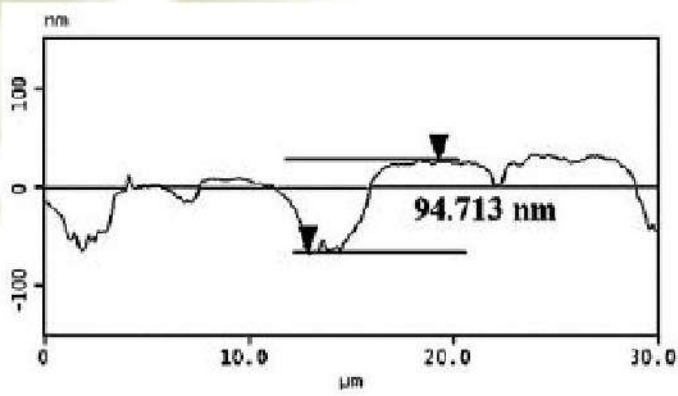
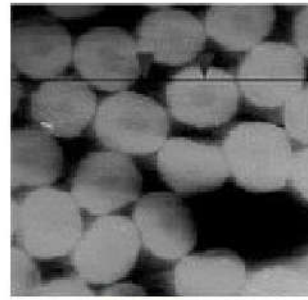


图18 原子力显微镜及其原理



a
Tapping mode



b
Contact mode

图19 原子力显微镜照片（AS4/VRM34复合材料）

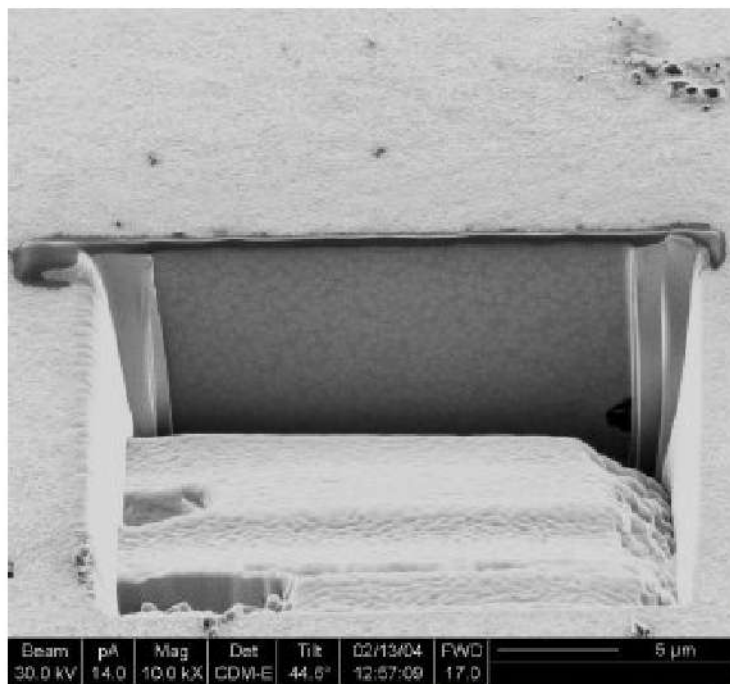


图20 聚焦离子束（FIB）分析仪

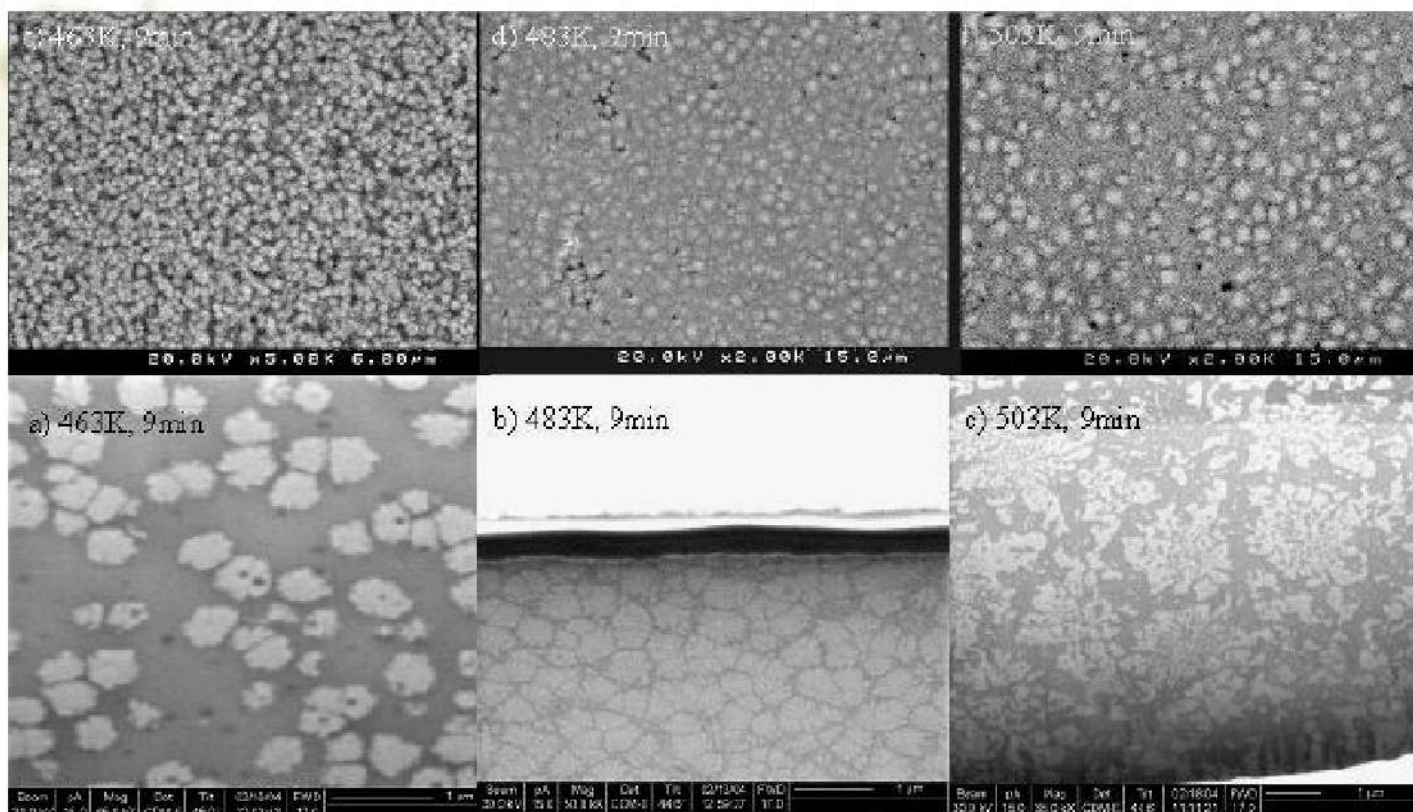


图21 聚焦离子束（FIB）照片（镁基BMG）

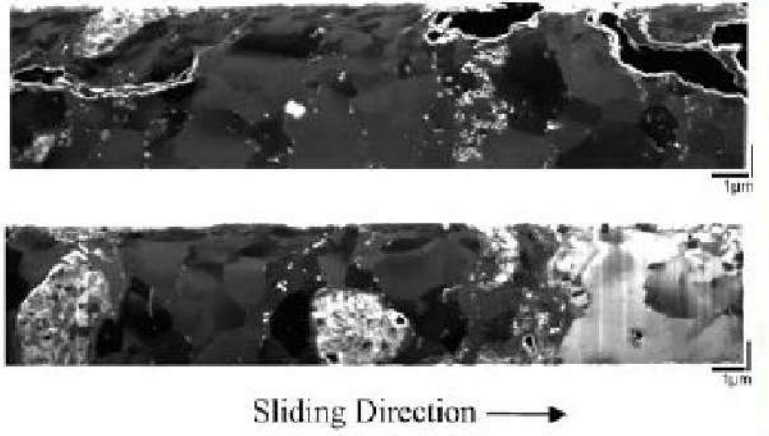
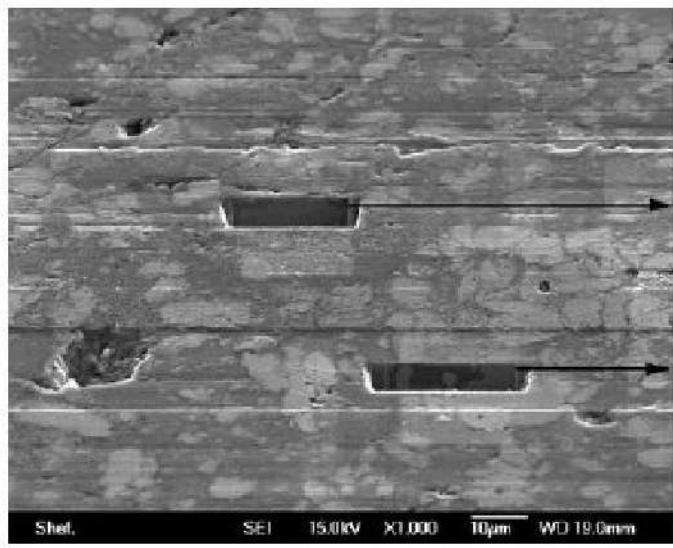


图22 聚焦离子束（FIB）照片（ $\text{Ni}_3\text{Al}/5056$ 复合材料界面）

2.7 复合材料界面表征

- ❖ 界面形态及界面层结构的表征
- ❖ 界面结合强度的表征
- ❖ 界面残余应力的表征
- ❖ 增强体表面性能的表征

思考题

- ❖ 1、界面结合强度表征有哪些方法？你认为哪一种或哪几种方法比较具有发展前途，为什么？
- ❖ 2、你认为在复合材料界面结构与宏观力学性能之间关系的研究还有哪些工作需要完善，有什么好的建议？

