



复合材料
破坏分析
及微观图谱

洗杏娟 李端义 著

科学出版社

复合材料 破坏分析 及微观图谱



洗杏娟 李端义 著

科学出版社

T3 330.3-64

X

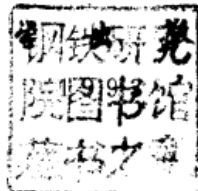
32

复合材料破坏分析及微观图谱

冼杏娟 李端义 著

GT04118

科



社

5

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书主要阐述复合材料微观结构与宏观力学性质的关系及微观动态破坏机理。书中反映了作者在完成国家重点科研课题中所取得的研究成果,其中240幅碳纤维及高模聚乙烯纤维增强树脂复合材料扫描电镜形貌照片,是从作者多年来从事复合材料研究工作所拍摄的近2000张照片中精选出来的,可为复合材料的微观研究和研制新材料、新工艺提供依据。

全书分四部分,包括:复合材料的三大组成结构(纤维、基体、界面);纤维表面处理及基体改性对复合材料力学性能的影响及微观机理;复合材料在拉伸、压缩、层间剪切、断裂与疲劳条件下的微观力学动态破坏及裂缝扩展;纤维铺设方向对复合材料力学性能的影响。

本书可供从事材料科学、航空、航天等研究的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

复合材料破坏分析及微观图谱

冼杏娟 李端义 著

责任编辑 童安齐

科学出版社出版

北京东黄城根北街15号

邮政编码:100717

北京市桦星电脑技术应用部激光照排

国防科工委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993年8月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1993年8月第一次印刷 印张:5 3/8

印数:1—1340 字数:137 000

ISBN 7-03-003475-9/TR·106

定价:12.00元

前 言

材料是科学技术发展的基础,也是社会现代化和发展的标志.从金属、无机非金属、高分子这三大类材料发展成为一种具有综合各类材料性能和自身特性的第四大类材料——先进复合材料,是60年代出现且目前正在飞跃发展的新型材料,广泛用于航空、航天、建筑、机械、生物工程等领域.它具有比强度和比刚度高、性能可设计、易加工成型等多种优越性能.它作为结构材料,比传统材料重量减轻20—50%,可用作功能材料.近10年来,先进复合材料每年以30%的增长率发展,这展示了在科学技术发展中将出现一个可以和空间时代、信息时代相媲美的复合材料时代.

复合材料由增强相、基体相和界面相组成,具有各向异性、非均匀性等力学特点,需要通过宏观和微观的测试和分析方法,研究其组分、结构与性能之间的相互关系和变化规律.近40年来,在先进复合材料研制、力学分析及测试,以及设计等方面,国外已出版了一批专著.我国近10年来也陆续出版了有关书籍,但远远满足不了读者需求.本书作者在从事复合材料微观形貌分析方面取得了一些成果,现将有关内容进行系统总结并撰写成本书.

本书从力学的观点分析纤维增强树脂复合材料的微观形貌,阐明复合材料微观结构与宏观力学性能之间的关系,以及微观动态破坏机理.复合材料的性能由组分的结构和设计所确定.根据使用要求改善微结构微区特性,从而提高复合材料的各项力学性能,进一步发挥复合材料从宏观到微观的可设计性这一优越性,并从微观形貌的变化阐述复合材料的增强增韧机理,这是本书写作的目的.

在以树脂、金属或陶瓷为基体的复合材料中,树脂基复合材料的应用范围最为广泛.在以长纤维、短纤维、晶须、粒子、碎

片纳米材料等为增强体的复合材料中,长纤维增强复合材料的力学性能和可设计性最佳。结合作者的实际工作,本书以碳纤维和新开发的超高模聚乙烯纤维增强树脂基体的复合材料为主要研究对象。

书中采用的微观测试仪器为扫描电子显微镜 (SEM),它具有较长的景深,能保持材料原有形貌的完整性和真实性,放大上万倍仍有清晰图象。它很适合测试不宜于研磨观察面的脆性纤维复合材料。同时对小尺度试样进行不同载荷条件下的试验时,用 SEM 可实时观测微结构动态损伤破坏过程,这比只能对破坏后的材料进行观察要优越得多,这也是 SEM 测试的特点之一。

本书共十章。第一章为绪论,介绍高聚合物基复合材料和扫描电镜测试的特点;第二、三章介绍碳纤维、超高模聚乙烯纤维和有关树脂基体,以及它们的微观损伤破坏;第四章论述高聚合物基复合材料界面的力学行为及破坏类型;第五章叙述碳纤维表面处理改善复合材料力学性能及微观机理;第六章阐述树脂基体改性,以提高复合材料宏观力学性能及增韧机理;第七至九章分别介绍纤维增强复合材料在层间剪切、拉伸、压缩、断裂疲劳及湿热环境条件下微结构的动态损伤及破坏形貌,并阐明微结构与宏观力学性能的关系;第十章介绍纤维铺设方向对复合材料力学性能的影响。第二至十章均列出相应的微观图谱。

本书反映了作者在完成国家“七五”攻关和自然科学基金项目中取得的研究成果。在本书撰写过程中,得到了中国科学院力学研究所的大力支持,宋焕成教授审阅了书稿,在此一并致谢。

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 复合材料及其发展	1
§ 1.2 复合材料的分类	2
§ 1.3 纤维增强高聚物基复合材料的优越性	3
§ 1.4 复合材料力学及其分析方法	6
§ 1.5 有效的微观测试手段——扫描电子显微镜 (SEM)	7
第二章 纤维的特性与 SEM 图谱	10
§ 2.1 纤维的作用与最佳含量	10
§ 2.2 碳纤维的制备与特性	13
§ 2.3 碳纤维及其 SEM 形貌	14
§ 2.4 高模聚乙烯纤维的特性	15
§ 2.5 超高模聚乙烯纤维的 SEM 形貌	16
纤维 SEM 图谱	17
第三章 高聚物基体的特性与 SEM 图谱	28
§ 3.1 基体的作用与高聚物基体的分类	28
§ 3.2 环氧树脂基体的特性	29
§ 3.3 环氧树脂 SEM 形貌	29
§ 3.4 高聚物基体改性的意义和方法	31
§ 3.5 丁腈橡胶增韧环氧树脂基体	32
§ 3.6 改性双马来酰亚胺树脂的特性	32
§ 3.7 改性双马来酰亚胺树脂 SEM 形貌	33
§ 3.8 聚乙烯树脂的特性	33
§ 3.9 低密度聚乙烯树脂 SEM 形貌	34
聚合物基体 SEM 图谱	34
第四章 高聚物基复合材料的界面	46
§ 4.1 复合材料界面的性质	46
§ 4.2 复合材料界面的表征及测试方法	47

§ 4.3 研究复合材料界面的理论及微观力学分析方法	49
§ 4.4 界面与高聚物基复合材料力学性能的关系	50
§ 4.5 碳纤维增强树脂复合材料界面 SEM 形貌	51
§ 4.6 超高模聚乙烯纤维增强树脂复合材料界面 SEM 形貌	54
纤维增强复合材料界面 SEM 图谱	55
第五章 碳纤维表面处理对复合材料力学性能的影响及微 观机理	62
§ 5.1 碳纤维表面处理的意义和方法	62
§ 5.2 等离子体处理碳纤维表面及其性能	63
§ 5.3 碳纤维表面处理对复合材料宏观力学性能的影响	64
§ 5.4 碳纤维表面经等离子体处理改善界面的增强增韧机理 (SEM 形貌)	66
碳纤维表面处理改善界面结构提高复合材料力学性能 SEM 图谱 ...	68
第六章 高聚物基体改性提高复合材料力学性能及增韧 机理	75
§ 6.1 碳纤维增强丁腈橡胶增韧环氧复合材料的力学性能	75
§ 6.2 碳纤维增强丁腈橡胶环氧复合材料的微观结构及增强增 韧机理	76
§ 6.3 碳纤维增强改性双马来酞亚胺基体复合材料的力学性能 ...	77
§ 6.4 T300碳纤维增强改性双马来酞亚胺基体复合材料 SEM 形貌	78
树脂基体改性提高复合材料宏观性能 SEM 图谱	78
第七章 复合材料在层间剪切、拉伸和压缩载荷条件下的 微结构动态破坏	88
§ 7.1 复合材料层间剪切强度	88
§ 7.2 碳纤维增强高聚物复合材料的层间剪切微结构动态破坏 ...	89
§ 7.3 碳纤维增强高聚物复合材料在湿热环境下的层剪破坏	90
§ 7.4 超高模聚乙烯 (UHMPE) 纤维增强低密度聚乙烯 (LDPE) 基体复合材料的层间剪切动态破坏	91
§ 7.5 碳纤维增强环氧复合材料的压缩动态破坏	91
§ 7.6 碳纤维增强环氧复合材料的微结构拉伸破坏	92
§ 7.7 超高模聚乙烯纤维 (UHMPE) 增强环氧 (EP) 正交编织 复合材料的压缩动态破坏	94

纤维增强树脂复合材料在层间剪切、拉伸、压缩载荷及湿热环境下的微结构动态破坏 SEM 图谱	94
第八章 高聚物基复合材料的断裂破坏及微观形貌	107
§ 8.1 高聚物基复合材料的损伤破坏特点	107
§ 8.2 碳纤维增强树脂复合材料的损伤扩展与断裂特性	107
§ 8.3 影响碳纤维复合材料断裂韧性的因素及动态断裂形貌	112
§ 8.4 超高模聚乙烯 (UHMPE) 纤维增强低密度聚乙烯 (LDPE) 复合材料的断裂行为	114
纤维增强树脂复合材料的动态断裂破坏 SEM 图谱	116
第九章 高聚物基复合材料的疲劳损伤累积及微结构破坏形貌	126
§ 9.1 复合材料的疲劳损伤破坏特点	126
§ 9.2 碳纤维增强环氧复合材料的疲劳性能	129
§ 9.3 碳纤维增强改性双马来酞亚胺复合材料的层间剪切疲劳及微观形貌	131
§ 9.4 碳纤维增强改性双马来酞亚胺复合材料断裂疲劳	133
碳纤维增强树脂复合材料的疲劳损伤断裂 SEM 图谱	135
第十章 纤维铺设角度对复合材料力学性能的影响	148
§ 10.1 多向铺层复合材料的特点	148
§ 10.2 多向叠层复合材料的破坏与强度	148
§ 10.3 对称正交铺层和角铺层复合材料破坏形貌	150
§ 10.4 纤维铺设 θ 角对 $[\pm \theta/90_2]_n$ 复合材料力学性能的影响及破坏形貌	151
§ 10.5 碳布及孔边复合材料的破坏形貌	152
纤维铺设方向对复合材料力学性能影响的 SEM 图谱	153
参考文献	162

第一章 绪 论

§ 1.1 复合材料及其发展

复合材料是由两种或两种以上固相物质所组成，它具有传统单一材料不可能具有的优越性能，如可对原有组分的性能取长补短，使其在构成上更为合理，在功能上更为有效。它由增强相和基体相复合而成，并形成界面相。增强相主要是支撑承载相；基体相主要是连接相；界面相的主要作用是传递载荷。三者的不同组分、复合工艺和铺设又使复合材料具有不同的性能。因此，从微观上说复合材料自身是具有非均匀性、各向异性的力学结构材料。

人工复合的复合材料曾经从结构合理和优化复合的天然复合材料（植物中的竹、木及茅草等，动物中的骨骼、肌肉等）中得到启示。作者曾研究过竹材的微观结构^[1-4]。竹子具有强度高的厚壁细胞——增强纤维，以及作为基体的薄壁细胞。它在长期抗自然风暴中经过进化，形成了竹子管壁径向由里向外纤维含量逐渐增加的结构，从而得到最佳的抗弯刚度。人工复合材料想要得到如此最佳的抗弯性能，在工艺上尚有待进一步探索。

从材料发展的角度来看，第一代是天然材料（如石块、泥土、竹、木、茅草等），第二代是冶炼材料（如各种金属），第三代是合成材料（如各种高分子聚合物），第四代则是先进复合材料。就复合材料而言，最早出现的人工复合材料如土坯、轮胎、钢筋混凝土等，到 40 年代出现了玻璃纤维增强塑料，又经过 20 多年的发展，研制出了性能优越的先进复合材料，即被人们称为材料发展进程中最有发展前途的第四代材料。本书论述的就是这类材料。

§ 1.2 复合材料的分类

(1) 按基体材料的不同, 复合材料可分为高聚物基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料三大类. 发展较早、工艺较成熟而且应用最广的是高聚物基复合材料. 由于它的使用温度一般不超过 $250-300^{\circ}\text{C}$, 因此适用于高温 ($\geq 450^{\circ}\text{C}$) 的金属基复合材料得到了发展. 它通常以铝、镍、锰、钛等作为基体, 以碳纤维、硼纤维、碳化硅纤维或晶须为增强体, 应用于发动机叶片、活塞、波导管等, 但其工艺复杂, 价格高. 陶瓷基复合材料改善了陶瓷的脆性弱点, 除了满足耐高温 ($\geq 1000^{\circ}\text{C}$) 的要求外, 还具有耐磨性好、硬度高的优点, 适用于刀具、模具、转动摩擦件等.

(2) 根据增强体外形 (几何形状), 复合材料可分为一维 (长纤维、短纤维、晶须)、二维 (片状)、三维 (颗粒状) 增强复合材料. 颗粒增强复合材料在宏观上可视为均匀各向同性, 在微观上则是不均匀的. 片状复合材料以薄片在两个方向起增强作用, 是横观各向同性, 一般用于功能材料, 如云母片增强复合材料.

纤维增强复合材料具有最佳的力学可设计性, 按使用要求又可分为单向、双向、多向和随机方向等几种.

(3) 根据纤维种类, 复合材料可分为碳纤维、芳纶纤维 (Kevlar)、高模聚乙烯 (HMPE) 纤维、硼纤维、高性能玻璃纤维、碳化硅纤维和氧化铝纤维增强复合材料等. 高性能玻璃纤维增强高聚物复合材料可用作天线、雷达罩或高温烧蚀材料等. 硼纤维直径为 $100\mu\text{m}$, 一般用作增强金属基复合材料和研究模型. Kevlar 或 HMPE 纤维增强高聚物复合材料比重小, 抗拉、抗冲击性能好, 应用于高压容器、防弹衣等. 碳化硅、氧化铝纤维主要用于增强金属复合材料 (碳纤维在 § 1.2 节论述). 根据使用要求, 以碳纤维与玻璃纤维或 Kevlar 纤维混杂增强的复合材料兼有几种纤维的优点, 如碳纤维与玻璃纤维混杂增强的复合材料, 既具有碳纤维的高强高模特性, 也具有玻璃纤维的良好抗冲击性能, 并降低

了成本。其混杂形式有层内混杂、层间混杂、夹心混杂、织物混杂等。

短纤维以玻璃纤维增强塑料为主,用于建筑和汽车零部件等。还有以短的碳纤维和玻璃纤维增强的水泥,用于建筑。这些短纤维增强复合材料一般呈准各向同性。

同纤维相比,晶须的尺度更小,直径为 $0.1\sim0.5\mu\text{m}$,平均长度为 $20\sim30\mu\text{m}$ 。它具有更高的强度,约相当于相邻原子间的作用力。目前已研制出陶瓷晶须和金属晶须,如碳化硅晶须抗拉强度达 20GPa ;钛酸钾晶须抗拉强度达 7000MPa ,弹性模量达 280GPa 。

近年发展了以结构组成尺度为 $1\sim100\text{nm}$ 的复合材料,还开发出能提高刚度并节省原材料的空心纤维和价廉的不连续长纤维(LDFTM)等。

(4) 根据用途,复合材料可分为结构复合材料和功能复合材料两大类。应用于承力结构件的具有优异力学性能的复合材料,称为结构复合材料,这类材料以纤维增强复合材料为主。复合材料最早应用于次受力构件,逐渐发展用于主承力构件。利用复合材料特殊的电、磁、光、热、放射性、耐腐蚀和生物相容性等性能制成具有不同功能的材料,称为功能复合材料,如能透过微波的材料,耐烧蚀的材料,防雷击、防热的镀镍石墨纤维屏蔽层等。新发展的双功能复合材料,既是结构材料,又具有特殊功能,如采用多角形截面的特种碳纤维与玻璃纤维混杂编织成三向织物,有许多微小的角锥,具有良好的透微波性能。用它制成的飞机多层吸波透波蒙皮,不但能满足飞机起动特性,又不会反射雷达波,有良好的“隐身”作用^[8]。

§ 1.3 纤维增强高聚物基复合材料的优越性

(1) 比强度及比刚度高。碳纤维和有机纤维增强高聚物复合材料的比强度(强度/密度)较钛合金高 $3\sim5$ 倍,比刚度(模量

/密度)较金属材料高4倍,但这些指的是沿纤维方向的特性.实际结构需要纤维增强高聚物的双向或多向的叠层复合材料,这种材料的比强度及比刚度虽较上述数据有所下降,但其具有其他许多优点,仍是轻质高强的先进材料.如将其应用在对重量要求严格的航天飞机、导弹、卫星等,可比传统材料减重20—60%,大大增加了有效载荷和航程.第一次中途不着陆、不加燃料的环球飞行的Voyager飞机,其构件就是采用碳纤维和Kevlar纤维复合材料制成.自重只有3.6kg的复合材料卫星支架,竟能承受9000kg的高载荷.复合材料制成的汽车框架、发动机、传动轴、弹簧等,比不用复合材料制成的可减重40—80%.石墨纤维复合材料制成的各类球拍、撑杆、钓鱼杆、弓箭、滑雪板、跳水板、自行车、滑翔机等运动器具,都具有重量轻、性能好的优点.

(2) 力学性能的可设计性. 在纤维增强的复合材料中,纤维是主要的承载元件,基体的作用是把纤维按一定位置排列固定,将载荷传递到每根纤维,因此可根据结构受力条件和使用要求,选择性能不同的纤维和基体,以及它们的体积百分比,设计纤维铺设方向、叠层,以及结构的形状和几何尺寸,以使结构在性能、重量和成本等方面的指标达到最优化.对功能材料可按所需要的特种功能进行选材和复合.例如,用碳纤维复合材料制作的叶片,按单向铺层,主要承受轴向力和弯矩,按 $\pm 45^\circ$ 铺层承受内外扭矩;通过合理铺层,可设计出线膨胀系数满足要求或有预应变的复合材料.

(3) 耐疲劳性能好. 先进复合材料在纤维方向的拉伸疲劳性能比金属好.碳纤维复合材料的疲劳强度为抗拉强度的60—90%,而金属的疲劳强度只为30—50%.金属材料疲劳裂纹出现后,很快引起灾难性的破坏,而没有明显的预兆.纤维增强复合材料在疲劳过程中,裂纹先在纤维或基体薄弱处出现,扩展到结合面,损伤逐渐累积,直至严重分层才导致破坏.这表明纤维增强复合材料具有较好的损伤容限和疲劳寿命^[6].因此,在疲劳条件下工作的构件,如机轴、轮毂、旋翼等均可采用纤维复合材料制

造。复合材料旋翼的寿命比金属制造的要高几倍。

(4) 减振性能好。复合材料的比刚度高, 因此它的构件具有很高的自振频率, 可防止共振的发生。纤维增强高聚合物复合材料的界面和层间存在内摩擦, 而由于聚合物基体具有粘弹性, 因此这种复合材料具有比金属大得多的内阻尼, 减振效率高。如加入相应的成分, 将能提高阻尼^[7]。卫星支架等均采用复合材料作减振材料。

(5) 容伤性能好。复合材料由于具有许多纤维, 所以受载后先是薄弱环节部分的纤维发生断裂, 使得应力重新分布, 然后通过基体传给未破断纤维, 因此不影响整个结构继续承载, 仍能安全使用。如单向碳纤维增强环氧试件缺口受轴向拉伸时, 其强度基本上相当于无缺口试件全截面减去缺口截面所计算得的强度值, 偏差在 7% 以内^[8]。此外, 复合材料在部分破损后, 可检查出破损处后加以修补, 如复合材料机翼、机身在中弹穿孔直径 25cm 后, 仍能返航修复。又如复合材料发动机叶片, 其前级破坏成碎块后, 比金属材料对其后级叶片的二次破坏要小。

(6) 耐高温或低温性能和热稳定性好。碳纤维增强聚酰亚胺等复合材料, 可在 250—300℃ 条件下使用, 高温蠕变变形小。碳/酚醛复合材料短时使用温度达 3000℃, 用作火箭发动机喉衬, 有良好的耐热冲击性能, 并可作为导弹弹头回地时的抗烧蚀材料, 如树脂中加重金属粉制成的防热层, 可作为反导弹导弹等的防激光加固层。碳纤维等的热膨胀系数很小, 因此又可设计使之接近于零, 于是在空间温差 260℃ 条件下, 结构不发生变形, 可应用于空间飞行器及太阳能电池、卫星天线、望远镜等。在低温条件下, 先进复合材料强度、韧性和疲劳性能等都较好。

(7) 成型工艺性能好。采用模压、缠绕、手糊和拉拔等复合材料成型工艺, 加工量小, 节省材料和能源, 减少模夹具。对大型的构件来说, 这些优点更显著。从手糊到自动化, 正是复合材料工艺发展的方向。许多形状复杂的构件, 可作为整体成型制造, 从而可减少零件数, 如现在的汽车有 15000 个零件, 如采用复合

材料制造,可能减少为几百个。

(8) 生物相容性好。碳纤维复合材料与人体软组织、骨骼和血液的相容性比金属好,可用作韧带、骨骼、假肢、心脏瓣膜和体外循环的血液过滤器等。

纤维增强高聚物基复合材料仍存在不足之处,例如,层间剪切性能和横向抗拉性能低,有待基体改性和改善界面状态来解决;碳纤维和常用的环氧树脂都较脆,断裂延伸率小,有待增韧基体来解决。除了材料工艺和质量不够稳定的情况需要通过研究采取措施解决外,多相非均匀各相异性结构材料复杂的力学分析理论,新的测试和计算方法,有待进一步发展完善,以便提供可靠的论据和优化的设计,充分发挥复合材料的优越性能。复合材料力学就是针对这些要求而形成的新的独立学科分支。

§ 1.4 复合材料力学及其分析方法

复合材料力学属固体力学范畴,但与材料科学密切相关。复合材料力学研究复合材料在各种受力条件下的强度、刚度、稳定和破坏等问题,包括复合材料力学性能参数、强度理论、应力应变、边界效应,特别是层间剪切、损伤断裂、冲击、疲劳、振动和高速动态性能等。复合材料除了具有各向均匀材料所具有的那些力学问题外,更由于其各向异性、非均匀性、非连续性、非线性等性质,与传统各向同性、均匀连续和线弹性的力学比较,有其特殊的理论和处理方法,同时还需考虑其组分、复合工艺等因素。因此,复合材料力学不仅需要宏观力学的分析方法,也需要微观力学的分析方法。

(1) 宏观力学分析方法。将单层或复合材料整体作为宏观均匀介质处理,研究它们的综合平均特性、宏观平均应力、应变等。实验测出它们宏观的弹性模量、强度、膨胀系数等,以这些宏观均匀性能为基础的力学理论,就是复合材料宏观力学。只要有符合实际情况的实验作基础,宏观处理方法是能得到较好结果的。

(2) 微观力学分析方法. 以纤维、基体和界面三大微结构的特性以及纤维的排列为基础, 研究复合材料的宏观特性, 称为复合材料微观力学 (也有人鉴于纤维等尚不属原子尺度层次, 称之为细观力学). 要进行微观力学分析, 需要实测纤维和基体的性能, 一方面用以预测和分析复合材料的宏观性能, 另一方面研究复合材料破坏过程中的微观不均匀性及微观破坏机理^[9]. 复合材料力学研究弹性、非线性弹性、粘弹性和弹塑性等复杂问题, 需要采用数值解法和有限元方法进行复杂的和大量的计算. 这时首先必须建立切合实际的计算模型, 而建立模型需要有实验作基础, 即需要进行必要的宏观测试和微观测试工作, 而后者要比前者复杂和困难得多.

§ 1.5 有效的微观测试手段 ——扫描电子显微镜 (SEM)

测试复合材料微结构性能与破坏有多种方法:

(1) 测试纤维和基体各项力学性能的破坏性试验.

(2) 利用超声波、声发射、声全息、X 光、同步辐射光、红外热象等作非破坏性试验, 间接了解复合材料在受力条件下的破坏过程, 但用这些手段所得到的物理量难与微观结构特性建立明确的对应关系.

(3) 测量纤维表面、界面结构的 X 光电子能谱 (XPS, ESCA)、俄歇能谱 (AES)、二次离子溅射质谱 (SIMS) 等, 但只能测到薄的表面层.

(4) 用扫描电镜 (SEM) 或透视电镜 (TEM) 测试材料的微观形态. 透视电镜有很高的分辨率, 能观察微观组织形貌, 但对样品厚度要求很苛刻. 样品厚度一般需小于 $1000 \text{ \AA}$, 有时要求小于 $200 \text{ \AA}$, 这对脆性复合材料是难以实现的. 扫描电镜也有很高的分辨率, 但对样品尺寸的要求较宽, 能给出各个方向的完整形貌. 此外, 还可以在电镜内装入加载装置, 以进行各种力学性能试验, 观

察微结构起始损伤和扩展的动态过程，这对研究微观破坏机理和建立微观力学模型起重要作用。文献[9]的作者就是根据别人用电镜拍摄到的复合材料在破坏过程中，纤维束出现弯折带的照片建立纤维弯折微观力学模型，并进行计算的。

扫描电镜是利用自样品表面发射出的微弱电子信号，经电子电路放大及处理后，在显象管荧光屏上成象的电子仪器。它的特点是：

1) 具有很高的分辨率。它利用电子光学的成象方式，可观察到 $100\text{ \AA}$ 甚至 $60\text{ \AA}$ 以下的细节。

2) 具有较高的放大倍数。通过电子光学系统的变换，调节视域和聚焦条件，扫描电镜的放大倍数可由 20 倍增至 20 万倍。在高放大倍数时，也能获得高亮度的清晰图象，可对三维表面进行细致详尽的观察。

3) 具有很长的景深。由于分辨率高、孔径角小，因此扫描电镜景深很长，成象有很强的立体感，真实感；视域大，与光学显微镜相比，在 100 倍同样放大倍数下，扫描电镜的景深约比光学显微镜大三个数量级。

4) 对样品处理要求简单。扫描电镜对样品要求保持原貌，不要求磨平。对导电材料，在清洗后即可直接观察。对非导电样品，先在真空镀膜器内蒸镀上一层金或银，即可观察。

5) 具有综合功能。将扫描电镜与 X 射线微区分析及电子衍射等仪器配合，可在观察形貌的同时，分析样品的化学成分及晶体结构，兼有成分分析仪的功能。配上加载或温度装置，可进行加热或冷却、拉伸、压缩、弯曲、剪切和断裂等试验，同时观察微观结构动态破坏。并可采用图象处理系统计算机自动进行处理。新发展的还有快速扫描电镜 (FSEM)，超高压扫描电镜 (UHVEN)，隧道扫描电镜等。

在扫描电镜内进行复合材料小尺度试样的力学性能测试，能从各个截面和表面观察和分析纤维、基体和界面微结构的形貌及损伤破坏过程，以及它们对宏观力学性能的影响，从而评估和改

善微结构的性能，并提供建立微观力学模型的依据。我们主要采用 HITACHIS-570 型扫描电镜，加载台最大加载能力为 2000N。我们自行设计配制了精度较高的测量和自动记录应力-应变的装置，以及适用于复合材料的拉伸、压缩、层间剪切、断裂的试验装置夹具。同时可进行实时录象。由于复合材料的组分和层次较多，因此需要根据研究的目的和复合材料的特点，从横截面、纵截面、表面、侧面等作多方向的观察，选择适当的加速电压和放大倍数，调整设备各项参数，捕捉动态过程中的重要信息，拍摄清晰的图象。作者在多年的研究中，拍摄了近 2000 张扫描电镜图片，从中精选了 240 幅图谱，阐明复合材料微观结构与宏观力学性能的关系及微观破坏机理。