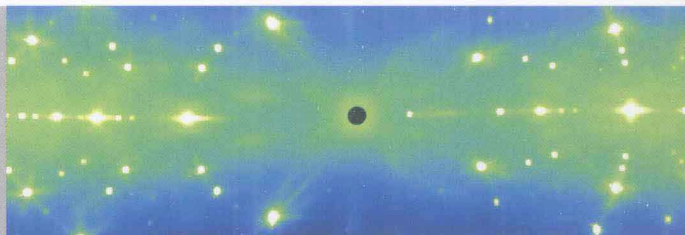


材料表征的近代物理方法

杨序纲 吴琪琳 编著



科学出版社

材料表征的近代物理方法

杨序纲 吴琪琳 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书简要阐述用于材料表征的几种传统物理方法,包括电子显微术、X射线衍射术、电子衍射术、红外吸收光谱术和成分分析方法等。主要篇幅用于阐述几种近代物理方法,包括激光拉曼光谱术、原子力显微术、同步辐射X射线术和多方法联用术。本书对各种近代物理方法的基本原理做了简单介绍,着重于阐明如何使用这些方法,它们在材料表征中能够提供哪些信息,各自的适用范围,以及优缺点的比较等。此外,还列举了各种技术的应用实例。

本书可作为材料及其相关领域的高校教师和科技工作者的参考用书,也可用作相关专业研究生和高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

材料表征的近代物理方法 / 杨序纲, 吴琪琳编著. —北京: 科学出版社, 2013. 6

ISBN 978-7-03-037797-5

I. ①材… II. ①杨…②吴… III. ①工程材料-物理性质试验
IV. ①TB302.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 126049 号

责任编辑: 刘宝莉 谷 宾 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第一版 开本: B5 (720×1000)

2013年6月第一次印刷 印张: 24 1/2

字数: 490 140

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

近十多年来，一些用于材料表征的近代物理方法的应用技术得到快速发展，对材料研究和新材料的开发作出了重要贡献。其中，表现较为突出的有原子力显微术、激光拉曼光谱术、同步辐射 X 射线术和多方法联用术。由于它们具备的强大功能，在某些应用领域已经取代或者正在取代许多重要的传统方法和技术。有关这些技术及其应用的论著众多，但大都分散发表于各个不同学科领域的出版物中，因此，一本可用于了解这些方法和技术的书籍是材料领域科技工作者所需要的。

本书扼要阐述几种近代物理方法的基本原理、相关的仪器学问题和操作模式，着重阐明这些方法在材料表征中能获得哪些有关材料结构和性能的信息及其相应的实验技术，并与传统方法相比较。全书共 6 章。第 1 章绪论，涉及材料表征的意义和内容以及表征的物理方法的分类。第 2 章简要叙述几种传统使用的重要表征技术，包括透射电子显微术、扫描电子显微术、X 射线衍射术、红外吸收光谱术以及成分分析方法。第 3~6 章是本书的主要内容，包括同步辐射 X 射线术、原子力显微术、激光拉曼光谱术和多方法联用术。本书内容力求新颖，取材着重于最近 10 余年来的前沿研究和最新应用成果。所有引用的资料都已注明出处，可供读者延伸阅读。

本书第 2 章 2.3 节、2.4 节以及第 3 章由吴琪琳撰写，其余各章节由杨序纲完成。本书写作过程中，阎捷、卡昂、王勇、杨湛、杨潇和张秀萍等老师给予了鼓励和支持，在此表示谢意。

本书著者学识有限，书中难免存在不足之处，在此预先感谢给予批评指正的读者。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 材料表征的意义和内容	1
1.2 材料微观结构表征的物理方法	1
第 2 章 材料表征的传统方法	5
2.1 透射电子显微术	5
2.1.1 概述	5
2.1.2 仪器和工作模式	6
2.1.3 图像衬度形成机制	12
2.1.4 选区电子衍射	19
2.1.5 试样制备技术	20
2.2 扫描电子显微术	32
2.2.1 概述	32
2.2.2 扫描电镜的成像原理和结构	35
2.2.3 高速电子流与固体物质的相互作用	37
2.2.4 结构细节、分辨率和衬度	41
2.2.5 图像衬度机制	43
2.2.6 试样准备	47
2.2.7 图像解释	50
2.2.8 应用实例	52
2.3 X 射线衍射术	58
2.3.1 布拉格定律	59
2.3.2 单晶体衍射	60
2.3.3 多晶体衍射	62
2.3.4 X 射线衍射术的最近进展	69
2.4 红外吸收光谱术	73
2.4.1 基本原理	73

2.4.2	分子的振动形式	74
2.4.3	红外光谱四要素	74
2.4.4	红外光谱术的应用	76
2.4.5	红外光谱新技术	80
2.5	材料的成分分析	82
2.5.1	特征 X 射线分析	82
2.5.2	背散射电子分析	87
2.5.3	俄歇电子分析	88
2.5.4	X 射线光电子能谱分析	90
	参考文献	92
第 3 章	同步辐射 X 射线术	95
3.1	引言	95
3.1.1	同步辐射光源的发生	95
3.1.2	同步辐射光源发展简史	96
3.1.3	同步辐射光源的构造	96
3.1.4	同步辐射光源的优点	98
3.1.5	同步辐射的应用概述	100
3.2	X 射线吸收精细结构	101
3.2.1	XAFS 简介	101
3.2.2	XAFS 装置	102
3.2.3	XAFS 实验方法和样品制备	103
3.2.4	XAFS 的应用实例	104
3.3	同步辐射 X 射线衍射技术	109
3.3.1	SR-XRD 简介	109
3.3.2	同步辐射 X 射线单晶衍射技术	110
3.3.3	同步辐射 X 射线多晶衍射技术	110
3.3.4	应用实例	112
3.4	同步辐射小角 X 射线散射	122
3.4.1	SR-SAXS 简介	122
3.4.2	SR-SAXS 应用实例	123
3.5	同步辐射其他线站的新进展	128

3.5.1 同步辐射软 X 射线谱学显微光束线站	128
3.5.2 硬 X 射线微聚焦线站	129
3.5.3 生物大分子晶体学线站	130
参考文献	130
第 4 章 原子力显微术	133
4.1 原子力显微术的主要功能和适用领域	133
4.1.1 SPM、STM 和 AFM	133
4.1.2 AFM 的主要功能	137
4.1.3 几种显微术的比较	138
4.2 基本原理和仪器学	138
4.2.1 仪器结构和成像原理	138
4.2.2 AFM 探针	140
4.2.3 针尖	144
4.3 操作模式	148
4.4 成像模式	150
4.4.1 高度像	150
4.4.2 相位像	156
4.4.3 设定比 r_{sp}	157
4.4.4 偏差像	161
4.4.5 侧向力像	163
4.4.6 力调制模式像	167
4.4.7 力曲线和纳米力学图	170
4.5 试样准备	181
4.5.1 概述	181
4.5.2 切片术和表面切平术	182
4.5.3 断裂面术	184
4.5.4 大分子试样的准备	185
4.6 图像解释	187
4.6.1 针尖引起的伪迹	188
4.6.2 光学干涉条纹	191
4.6.3 热漂移	191

4.6.4	扫描器性能的影响	192
4.6.5	振动引起的伪迹	194
4.6.6	针尖力的影响	194
4.7	材料表征的 AFM 应用	196
4.7.1	聚合物材料	196
4.7.2	碳材料	218
4.7.3	复合材料	224
	参考文献	228
第 5 章	激光拉曼光谱术	235
5.1	拉曼光谱术的适用范围	235
5.2	拉曼散射和拉曼光谱	237
5.2.1	拉曼散射和瑞利散射	237
5.2.2	拉曼峰的频移、强度、峰宽和偏振	239
5.2.3	温度和压力对拉曼峰的影响	241
5.2.4	定量分析和定性分析	243
5.3	仪器和主要技术	245
5.3.1	拉曼光谱仪	245
5.3.2	显微拉曼光谱术	249
5.3.3	纤维光学拉曼光谱术	252
5.3.4	增强拉曼光谱术	255
5.3.5	拉曼光谱的噪声及其减除	259
5.3.6	试样准备和安置	265
5.4	拉曼光谱术的应用	269
5.4.1	成分鉴别	269
5.4.2	聚合物的分子结构	278
5.4.3	结晶结构	279
5.4.4	取向结构	290
5.4.5	共混聚合物的相结构	293
5.4.6	界面微观结构	298
5.4.7	界面微观力学	303
	参考文献	337

第 6 章 多方法联用术	343
6.1 概述	343
6.2 AFM 与拉曼光谱术的联合	346
6.2.1 AFM 与拉曼光谱术联合的功能	346
6.2.2 针尖增强拉曼光谱术	350
6.2.3 近场光学显微术	352
6.2.4 AFM/拉曼系统仪器学	357
6.3 SEM 与拉曼光谱术的联合	359
6.4 红外光谱术与拉曼光谱术的联合	364
6.5 AFM 与红外光谱术的联合和纳米红外光谱术	368
6.5.1 AFM 与红外光谱术的联合	368
6.5.2 纳米红外光谱术	370
6.6 AFM 与 TEM 的联合应用	372
6.6.1 AFM 和 TEM 的依次测试	372
6.6.2 AFM 与超薄切片机的联合	374
6.7 在线多技术联用	375
参考文献	379

第 1 章 绪 论

1.1 材料表征的意义和内容

材料表征通常是指对材料微观结构的分析，有时也包含对材料性能和结构与性能关系的分析。

无论是有机材料还是无机材料，它们的结构，包括成分和组织构造，都有着不同程度的不均匀性。材料的性质与这种不均匀性密切相关。显然，对不均匀结构的详尽分析对原有材料的合理利用和发展新材料是至关重要的。结构分析，在一定意义上可以说是在不同空间尺度的不均匀性分析。

例如，对聚合物材料，结构分析包括从分子结构到聚集态结构的分析，相应的空间尺度为从纳米级到微米级的范围。分子结构的表征包括探索结构单元的化学组成、键接方式、空间立构、支化与支联以及共聚物的序列结构等。聚集态分析则主要包括结晶结构、原纤结构和共混物相结构、共聚物微相结构以及它们的取向的探索。结晶结构的表征内容丰富，包括“宏观”的结晶度和晶体的晶型、晶体内部的位错和层错等缺陷以及晶界、空穴和杂质局部应力和应变等。取向结构的内容则包括大分子排列的取向和聚集态结构单元的排列取向。本书所述的材料表征主要是指对材料聚集态的结构分析。

1.2 材料微观结构表征的物理方法

有许多方法可用于材料微观结构的表征，包括化学方法和物理方法，前者不在本书的内容范围之内。

物理方法主要是利用某种能量束与试样物质相互作用，检测来自试样的，由于这种相互作用而产生的多种多样信息，分析这些信息，从而获取试样结构和性能的资料。常用能量束可以是高速电子流，或者某种波长的电磁波。近代发展迅速的原子力显微术则将针尖作用力作为试样物质信息的激发源。

按照处理来自试样信息的不同方式，可将微观结构表征的物理方法分为以下几种。

1. 成像方法

光学显微成像是最经济、最普及的结构分析方法，包括常用的振幅显微成像、相位衬度成像、相干成像和偏振光成像。光学成像能给出试样形态学、结晶学和组织学等聚集态结构的资料。光学成像的空间分辨率受到光波衍射的限制。

电子显微成像检测来自试样物质的电子信号成像，具有比光学显微成像高得多的空间分辨率。常用的有透射电子像和扫描二次电子像。电子像能以高空间分辨率（0.1nm 级）给出固体聚集态的结构资料。图像解释时必须特别注意考虑图像形成的衬度机制。

显微拉曼光谱术的微米级的空间分辨率能给出试样的成分像、结晶度像以及共混物的相结构像。针尖增强和近场光学拉曼光谱术的出现，预示着可以获得纳米级空间分辨率的图像。

原子力显微术除了能提供试样的形貌和组织学结构像外，还能给出试样物质的力学和物理性质像。图像的空间分辨率在很大程度上取决于所用针尖尖端直径的大小，可达到 0.1nm。诸如单个大分子的纳米尺度成像已非难事。

2. 衍射方法

这种方法利用射线穿越试样物质时产生的衍射花样分析材料结构。射线可以是光波、高速电子流和高速中子流等。衍射方法主要用于探测材料物质的结晶结构（例如，获得结晶度和晶胞参数）和取向结构（包括大分子取向和晶体取向）。

X 射线衍射是应用最广泛的衍射方法。常用 X 射线衍射术测得的是试样整体的统计性质（参数的整体平均值）。近代同步辐射 X 射线源可以提供很小直径的高亮度的入射光，获得试样小区域的衍射花样。

电子衍射是另一种广泛应用的衍射方法。电子衍射可以在专用电子衍射仪中完成，也可在透射电子显微镜中完成。这是一种微区分析。例如，常用的选区电子衍射可以选取试样中 0.5~1.0 μm 的微区进行电子衍射分析。在高压电镜中可实行显微电子衍射（或微微区电子衍射），操作时借助于扫描附件所提供的细聚焦电子束，使试样被辐照的区域直径小于 0.1 μm ，甚至达到 10~20nm，并以扫描透射成像方式选择被分析的微区，从而显著缩小选区范围。

中子衍射是另一种应用衍射方法研究物质结构的重要手段，特别适合于聚合物大分子，包括生物大分子的空间结构分析。中子衍射通常是指德布罗意波长为 10cm 左右的中子（热中子）流通过试样时发生的衍射。入射中子与试样物质的原子核相互作用，它遭受不同原子核散射时的散射强度不是随值单调变化的函数。这样，中子就特别适合于确定点阵中轻元素的位置（X 射线衍射灵敏度较

低)和其邻近元素的位置(X射线衍射不易分辨)。所以,中子衍射常用于晶体结构的轻元素定位工作。当然,中子衍射也应用于结构相变、择优取向、晶体形貌、位错缺陷和非晶态等方面的研究。此外,中子比X射线具有高得多的穿透性,因而更适于需用厚容器的高温/低温/高压等条件下的结构研究。这种方法的主要缺点是需要特殊的强中子源,而且常常由于源强不足需要较大块的试样和较长的数据收集时间。

3. 光谱分析方法

光谱分析法有下列三种基本类型:吸收光谱分析(如红外或紫外吸收光谱的分析)、发射光谱分析(如荧光光谱分析)和散射光谱分析(如拉曼光谱分析)。当入射光与试样分子、原子或离子发生相互作用时,一般情况下处于基态的试样分子、原子或离子吸收光能使分子从低能级跃迁到高能级产生吸收光谱。当分子、原子或离子从受激高能级回迁到低能级时释放出能量,形成发射光谱。当光子与分子发生非弹性碰撞,随着试样分子能级的跃迁,被散射光的频率发生变化所形成的光谱称为散射光谱。分子能级的跃迁是量子化的,与入射光波的能量和物质本身的结构有关,因而检测光波与物质相互作用的信息,能够获得物质结构的定性和定量数据。除去使用光波作为激发能量源外,也使用其他能量流,如电子束、热能、电能和化学能,获得表征材料结构的光谱。

1) 原子光谱

原子光谱包括发射光谱和吸收光谱,是由原子中电子能级之间的跃迁而产生的。这类光谱只能给出试样物质的元素组成和含量,而不能给出分子结构的信息。激发能量可以是热能、电能或化学能。

2) 分子吸收光谱

按波长分类,分子吸收光谱可分为紫外、红外和远红外等三类光谱。紫外光谱是指波长在200~400nm范围的光谱,有时也扩展到可见光范围(400~750nm)。这是分子中电子能级跃迁产生的光谱,所以又称电子能谱。红外光谱的波长范围通常是指0.75~1000 μm 。这是分子内各原子间振动能级跃迁产生的光谱,又称为振动能谱。远红外光谱具有微米级的波长,是分子作为一个整体的转动能级跃迁产生的光谱,所以又称转动光谱。

红外吸收光谱术主要用于聚合物材料的研究,尤其适用于分子结构研究。

3) 分子散射光谱

拉曼光谱是一种分子散射光谱,相应的测试技术是近代发展起来的一种材料表征的强有力手段。拉曼光谱包括光子与分子发生非弹性碰撞产生的反斯托克斯谱线和斯托克斯谱线。这些谱线相对于入射光有一频率位移,拉曼光谱以这种频

移的波数作为横坐标。

拉曼光谱术可用于研究几乎所有各种不同类型和聚集形态的材料，包括无机材料和有机材料，固态、液态或气态的物质聚集状态。能给出分子结构的资料，也能应用于聚集态结构分析。

4) 特征 X 射线光谱

在外界激发能量作用下原子内层电子发生能级间跃迁时产生特征 X 射线。这种射线的波长具有“指纹”特征，所以特征 X 射线光谱可用于试样的成分（元素）分析。

常用的有两种激发能量源：X 射线和高速电子流。与前者相应的光谱分析称为 X 射线荧光分析，而与后者相应的则是能谱分析。通常的电子显微镜大都配备有合适的配件（能谱仪），可作特征 X 射线分析。

4. 针尖作用力方法

原子力显微术从检测探针针尖与试样之间相互作用产生的各种不同物理信息来表征试样物质的结构和性能。它具有高空间分辨率的材料微观结构分析功能、局部微区力学和物理性质测定以及其他诸如纳米尺度的微机械加工等能力，近年来已经成为先进材料研究不可或缺的重要表征手段。

5. 其他方法

其他用于材料表征的重要物理方法还有诸如波谱分析（包括核磁共振波谱分析和电子自旋共振波谱分析）、电子能谱分析（包括光电子能谱和俄歇电子能谱分析）、热分析、声速法和高压汞渗透法等。这些方法大都不在本书阐述范围之内。

第 2 章 材料表征的传统方法

2.1 透射电子显微术^[1~6]

2.1.1 概述

透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM, 简称透射电镜) 是一种电子光学仪器。由于高速电子流的德布罗意波波长比光波波长短几个数量级, 而且可以被电磁透镜聚焦, 电子显微镜具有超高分辨和高放大倍率成像的能力。

透射电镜工作时, 将经过加速和聚焦的电子束投射到很薄的试样上, 电子与试样中的分子原子相碰撞而改变方向, 发生呈立体角分布的散射。散射角的大小与试样的密度、厚度和结构相关, 因而形成不同区域明暗不同的影像。通常, 透射电镜的分辨率可达到 $0.1\sim 0.2\text{nm}$, 放大倍数为几千甚至百万倍, 可用于观察材料的超微结构。供透射电镜观察的试样必须制成电子束能穿透的, 厚度为 $100\sim 2000\text{\AA}$ 的薄膜 (超高压电镜可穿透更厚的试样)。成像方式与光学显微镜相似, 只是以电磁透镜代替玻璃透镜。放大后的电子像可在荧光屏上显示或摄成照片。

过去几十年来, 透射电子显微术 (transmission electron microscopy) 是探索材料微观结构最重要, 也是应用最广泛的工具之一。它的超高分辨性能只有近代发展起来的扫描探针显微术可以与之比拟。

工作模式多样是它的另一个重要优点。透射电镜不仅具有通常显微镜的放大功能, 它还可以作为一台电子衍射仪提供试样的结构信息。使用各种信号探测器, 它又能对试样作化学成分、磁学性能和电学性能的分析。配置不同的试样台, 可以作冷冻、加热和原位电学/力学性能的分析。这些功能之间的转换方便, 甚至可以同时进行。

然而透射电子显微术的缺点也是显而易见的, 主要有以下几点。

1. 破坏性试样制备

TEM 要求试样很薄, 以使电子束能够穿过。对于大多数材料, 要求其厚度在微米以下。这显然远远低于通常块状材料的厚度, 所以必须预先将样品减薄。减薄, 实际上是个对材料的破坏过程。这个过程有可能使材料结构发生变化, 以致最终看到的并非材料原先的性质, 而是制样过程中引入的假象。

2. 电子束轰击损伤

TEM中使用高能电子束照射试样，电子能量高达 $10^5 \sim 10^6$ eV数量级，并且束流密度很高。在观察过程中大量高能电子被持续地倾泻到试样上，大部分电子会毫无遮挡地穿过试样，其余的电子会和试样内的原子发生碰撞，并且可能在碰撞时向原子传递能量。试样吸收能量后可能出现多种变化，例如，温度升高，原子电离和原子移动等。这些变化又可能引发更多相关变化，例如，相变、缺陷移动、结构崩塌和原子迁移等。这些行为都可能引起试样不可恢复的损伤。

3. 真空环境

TEM实验要求在高真空环境下运行。这种内部环境与理想条件的差距可能会对材料的性质或结构产生影响，尤其是做表面研究的时候。

4. 低采样率

这是TEM的一个重大缺点。由于TEM的观察范围很小，而且试样很薄，实验测试到的试样区域只占整体材料的极小一部分。这个微小的区域未必能真实反映整体材料的性质。因此，基于TEM实验数据做结论的时候一定要慎重，必须仔细考虑所得实验结果是否具有普遍意义。

这些缺点限制了透射电子显微术在材料表征中的应用范围。近十多年来发展迅速的扫描探针显微术在很大程度上有效地克服了上述缺点。

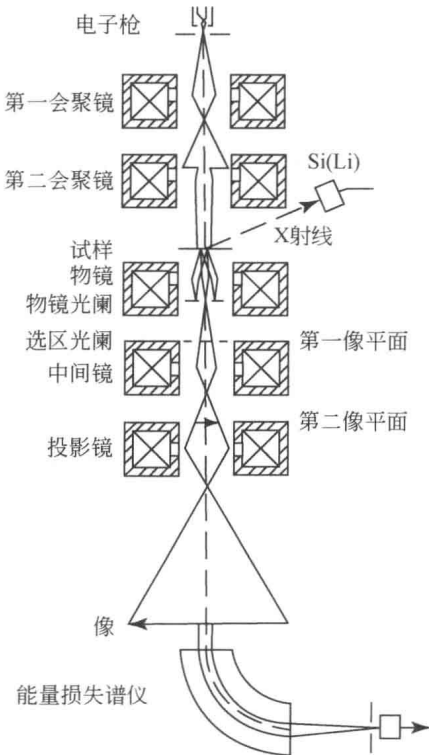


图 2.1 透射电镜的结构和光路简图

2.1.2 仪器和工作模式

透射电镜通常由四大部分组成。图 2.1 为仪器结构简图，显示了仪器的主要部分，包括照明系统、成像系统、记录系统和未在图中显示的真空系统。

1. 照明系统

照明系统包括电子枪和聚光镜。电子枪是产生稳定电子源的一种装置。电子枪

产生电子束，电子束是一种带电的粒子流。空气对于电子束有明显的阻碍作用，为此必须使镜筒内部保持超高真空，以增大电子的平均自由程。电子束的波长随加速电压的波动而变化。为了保持电子束波长的单一性，必须使电子显微镜的电压波动降低到十万分之一以下。电压的稳定程度，将是获得高分辨率图像的一个必要因素。

有两种类型的电子枪，热电子发射型电子枪和场发射型电子枪。

热电子发射型电子枪由阴极、栅极和阳极组成。阴极（灯丝）用钨丝或支撑在两根钨丝上的 LaB_6 单晶制成，栅极为中央有一圆孔的帽状物，阳极则呈中央有孔的圆盖状。当灯丝两端接通加热电流后，热电子就从阴极的尖端发射。阴极和阳极之间有着高的电位差，使电子以很快的速度穿过阳极孔，射向试样。栅极对电子束流起会聚和稳定作用。

场发射型电子枪是 20 世纪 70 年代末期研制成功的。所谓场发射，是指金属表面在强电场的作用下，由于隧道效应，金属内部的电子穿过势垒从金属表面发射出来的现象。场发射枪具有两个阳极，第一个阳极使电子从金属中逸出，第二个阳极则使电子加速。场发射枪的阴极尖端形状尖锐，其曲率半径小于 $0.1\mu\text{m}$ ，称为发射极。场发射电子枪又被分为冷阴极式和热阴极式两种，它们各有利弊。

从性能而言，钨灯丝是其中较差的一种，但其价格低廉，而且容易更换，目前在常规电镜中仍在继续使用。 LaB_6 单晶灯丝价格比起钨灯丝要高得多，电子枪的真空度要求比钨灯丝高两个数量级，但是其亮度比钨灯丝高出 10 倍，光源尺寸和能量发散度都比钨灯丝小（因而电子枪的相干性比较好），使用寿命要长得多。所以，近年来使用 LaB_6 单晶灯丝者已逐渐增多。

场发射电子枪具有亮度高、光源尺寸小和能量发散度低等优点。因而，使用它不仅可观察较厚的试样，而且电子束的相干性能也更好，从而有利于提高透射电镜的分辨本领。配备场发射电子枪的透射电镜价格一般比较昂贵，但因其能拍摄高质量的图像，并可用于电子全息照相术（electron holography），目前已开始在高分辨型透射电镜（HRTEM）和分析型透射电镜（ATEM）中使用。

聚光镜用来会聚电子枪所发射的电子束流，并以适当的亮度照射试样。现代电子显微镜一般都采用双聚光镜系统。第一聚光镜为强激磁透镜，用以缩小电子束斑；第二聚光镜为弱激磁透镜，具有较长的焦距，因而可以获得足够的空间来放置试样和其他附件。聚光镜系统可用于调节束电流密度、束斑大小和束孔径角。

在照明系统和成像系统之间是试样室。试样台位于试样室的下部。上部可安置二次电子探头和 X 射线探头等其他探测器。试样台的作用是承载试样架，使试样架能在物镜极靴孔内平移、倾斜和旋转，以便于选择感兴趣的试样区域或位向。试样安装在试样架上，随后插入试样台中。试样架必须使试样牢固地夹持在

试样座中并保持良好的热和电接触，减小因电子照射引起的热或电荷堆积而产生的试样损伤或图像漂移。试样台的平移和倾斜机构有足够的机械精度。有各种类型的试样架可供选用，使试样可以在试样室中倾斜、旋转、加热、冷却或拉伸。

2. 成像系统

成像系统包括成像透镜、光阑和消像散器。成像透镜由物镜、中间镜和投影镜组成。其作用是将透过试样的电子束流成像和放大，并最终投影在荧光屏或照相底片上。

物镜是对试样成像放大最为关键的透镜，它的任何缺陷都将被成像系统的其他透镜进一步放大，所以其性能的好坏对仪器的分辨本领影响极大。通常要求物镜的各种像差尽可能地小，并且借助物镜光阑和消像散器进一步减小像差，以提高图像的衬度和分辨本领。

物镜和试样之间的距离是固定不变的（物距不变），物镜放大倍数的变化通过改变物镜的焦距和像距来实现。

中间镜位于物镜和投影镜之间，通常由两个弱激磁的变倍透镜组成。其主要作用是通过改变其激磁电流，调节透射电子显微像的放大倍数。在操作上是利用它的可变倍率来控制电镜的总放大倍数。如若把中间镜的物平面和物镜的像平面重合，将得到放大像；如果把中间镜的物平面和物镜的背焦面重合，则得到电子衍射花样。

投影镜用以将图像进一步放大，并将试样的最终图像投影到荧光屏或照相底片上。

图像放大倍数 M 可由下式计算：

$$M = M_0 M_1 M_P \quad (2.1)$$

式中， M_0 、 M_1 和 M_P 分别表示物镜、中间镜和投影镜的放大倍数。

选区光阑也是一个重要组件。它位于物镜的像平面上，用于限定试样分析的微区，直径为 $20 \sim 400 \mu\text{m}$ 。

3. 观察记录系统

观察记录系统位于镜筒的下部，包括荧光屏和照相装置两部分。

现代电镜多选用 CCD 相机对各种电子图像进行记录和存储，并可图像直接输出、转录或通过网络进行远距离传送。

4. 真空系统

电镜运行时，整个电子通道都必须处于超高真空状态，亦即整个镜筒内部必