

扫描电镜的基本原理及应用

余凌竹, 鲁建

(四川大学生物材料工程技术研究中心, 四川成都 610064)

摘要 扫描电镜主要用于样品微区形貌、结构及成分的观察和分析。扫描电镜具有高的分辨率、良好的景深以及简易的操作等优点, 使其在材料学、物理学、化学、生物学、考古学、地矿学以及微电子工业等领域有广泛的应用。该文结合多年的扫描电镜测试经验介绍了扫描电镜的基本原理、构造、优势以及在实际中的应用, 为扫描电镜的初学者及从业者全面了解和使用扫描电镜提供一定的帮助。

关键词 扫描电镜; 基本原理; 构造; 优势; 应用

中图分类号 TH89

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1672-4550.2019.05.019

The Fundamental Principles and Applications of Scanning Electron Microscopy

YU Lingzhu and LU Jian

(National Engineering Research Center for Biomaterials, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract The scanning electron microscopy (SEM) is mainly used for the observation and analysis of morphology, structure, and composition of samples. The SEM possesses advantages in resolution, depth of field and ease of operation. It plays an important role and is widely used in materials, physics, chemistry, biology, geology, archaeology, microelectronics industry, etc. Based on our experience of operating the SEM, this paper introduces the fundamental principle, construction, advantages, and applications of the SEM, which is helpful for the SEM learner and operator to grasp and use the SEM.

Key words scanning electron microscopy; fundamental principles; constructions; advantages; applications

随着现代科学技术的发展, 大量的科研工作着将研究的方向集中在了对微观世界的探索。然而, 仅靠人眼的分辨率(约为0.2 mm)并不能满足要求。为了观察更微观的世界, 分析更微小的细节, 各种具有放大功能的显微镜应运而生。首先出现的是光学显微镜。光学显微镜的分辨率用瑞利公式表示如下:

$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} \quad (1)$$

式中, λ 为波长, n 为折射率, α 为孔径角^[1]。在上述公式中, 入射波长 λ 是影响光学显微镜分辨率的主要因素。然而, 受可见光波长范围(400~760 nm)的限制, 光学显微镜的极限分辨率约为200 nm^[2]。为了突破光学显微镜分辨本领的极限, 科学家利用波粒二象性原理(即电子在加速电压下运动, 其波长可达可见光波长的十万分之一), 以

加速电子充当新光源制备了高分辨率的扫描电子显微镜, 以下简称扫描电镜。目前, 扫描电镜在科研及生产等多个领域发挥着非常重要的作用。全面了解扫描电镜的基本原理及应用范围为我们很好地使用扫描电镜提供了很重要的指导意义。

1 扫描电镜的基本原理

扫描电镜是利用电子枪发射电子束经聚焦后在试样表面作光栅状扫描, 通过检测电子与试样相互作用产生的信号对试样表面的成分、形貌及结构等进行观察和分析。入射电子与试样相互作用将激发出二次电子、背散射电子、吸收电子、俄歇电子、阴极荧光和特征X射线等各种信息(如图1所示)^[3]。扫描电镜主要利用的是二次电子、背散射电子以及特征X射线等信号对样品表面的特征进行分析。

收稿日期: 2018-01-24; 修回日期: 2018-04-04

基金项目: 四川大学实验技术立项(20170212)。

作者简介: 余凌竹(1988-), 女, 硕士, 实验师, 主要从事大型仪器分析和管理工作。

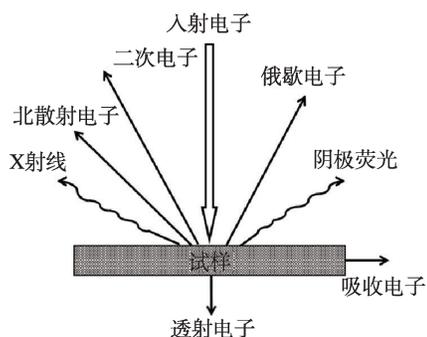


图1 电子与试样相互作用产生的各种信号

1.1 二次电子

二次电子是指被入射电子激发出来的试样原子中的外层电子。二次电子能量很低，只有靠近试样表面几纳米深度内的电子才能逸出表面。因此，它对试样表面的状态非常敏感，主要用于扫描电镜中试样表面形貌的观察。入射电子在试样中有泪滴状扩散范围，但在试样的表层尚不会发

生明显的扩散，致使二次电子像有很高的空间分辨率^[4]。

1.2 背散射电子

背散射电子是指入射电子在试样中经散射后再从上表面射出来的电子。背散射电子可用于分析试样的表面形貌。与此同时，背散射电子的产额随着试样原子序数的增大而增加，能显示原子序数衬度，可用于对试样成分作定性的分析。

1.3 特征X射线

特征X射线是指入射电子将试样原子内层电子激发后，外层电子向内层电子跃迁时产生的具有特殊能量的电磁辐射^[5]。特征X射线的能量为原子两壳层的能量差($\Delta E = E_K - E_L$)，由于元素原子的各个电子能级能量为确实值，因此，特征X射线能分析试样的组成成分。

现将各种电子信号的用途、分析深度以及探测限总结如表1所示。

表1 各种电子信号的用途、分析深度及探测限

电子信号	用途	分析深度	探测限
二次电子	表面形貌分析	<10 nm	分辨率3~6 nm
背散射电子	表面形貌和成分分析	0.1~1 μm	分辨率50~200 nm
特征X射线	元素分析	0.5~5 μm	${}_{4}\text{Be}\sim{}_{92}\text{U}$ (0.1wt%~0.5wt%)

2 扫描电镜的构造

扫描电镜主要由电子光学系统，信号收集及处理系统，信号显示及记录系统，真空系统，计算机控制系统等几部分组成。

2.1 电子光学系统

电子光学系统由电子枪，电磁透镜，扫描线圈及试样室等部件组成。由电子枪发射的高能电子束经两级电磁透镜聚焦后汇聚成一个几纳米大小的束斑，电子束在扫描线圈的作用下发生偏转并在试样表面和屏幕上做同步扫描，激发出试样表面的多种信号。

2.2 信号收集及显示系统

电子束与样品室中的样品表面相互作用激发的二次电子，背散射电子首先打到二次电子探测器和背散射电子探测器中的闪烁体上产生光，再经光电倍增管将光信号转换为电信号，进一步经前置放大器成为有足够功率的输出信号，最终在阴极射线管(CRT)上成放大像^[6]。

产生的X射线信号由斜插入样品室中的能谱仪(或波谱仪)收集，经锂漂移硅(Si(Li))探测器、前

置放大器和主放大器以及脉冲处理器在显示器中展示X射线能谱图(或波谱图)用于元素定性和定量分析。

2.3 真空系统

扫描电镜需要高的真空度。高真空度能减少电子的能量损失，减少电子光路的污染并提高灯丝的寿命。根据扫描电镜类型(钨灯丝，六硼化镧，场发射扫描电镜)的不同，其所需的真空度不同，一般在 $10^{-3}\sim 10^{-8}\text{Pa}$ ^[7]。

2.4 计算机控制系统

扫描电镜有一套完整的计算机控制系统，方便测试人员对电镜进行控制和操作。

3 扫描电镜样品测试的优点

扫描电镜对样品微区结构的观察和分析具有简单、易行等特点，是目前应用得最为广泛的一种试样表征方式，它相比于光学显微镜和透射电镜有其特有的优势。

3.1 景深长，视野大

扫描电镜的物镜采用小孔视角，长焦距，所以具有大的景深。在同放大倍数下，扫描电镜

的景深大于透射电镜,远大于光学显微镜。扫描电镜二次电子产生的多少与电子束入射角度样品表面的起伏有关,所以,扫描电镜的图像具有很强的立体感,可用于观察样品的三维立体结构。

3.2 样品制备简单

扫描电镜的样品室较大,可观察大到200毫米,高为几十毫米的样品。扫描电镜的样品制备相比透射电镜而言要简单得多,样品可以是断口,块体,粉体等。对于导电的样品只要大小合适即可直接观察,对于不导电的样品需在样品表面喷镀一层导电膜(通常为金、铂或碳)后进行观察。现代发展起来的低压扫描电镜和环境扫描电镜可以对不导电样品,生物样品等进行直接观察,极大地扩展了扫描电镜的应用范围。

3.3 分辨本领高,倍率连续可调

扫描电镜具有很高的分辨率,普通扫描电镜的分辨率为几纳米,场发射扫描电镜的分辨率可达1 nm,已十分接近透射电镜的水平。光学显微镜只能在低倍率下使用,而透射电镜只能在高倍率下使用,扫描电镜可以在几倍到几十万倍的范围内连续可调,弥补了从光学显微镜到透射电镜观察的一个很大的跨度,实现了对样品从宏观到微观的观察和分析。

3.4 综合分析能力强

扫描电镜可以对样品进行旋转,倾斜等操作,

能对样品的各个部位进行观察。此外,扫描电镜可以安装不同的检测器(如能谱仪(EDS),波谱仪(WDS)以及电子背散射衍射(EBSD)等)来接收不同的信号,以便对样品微区的成分和晶体取向等特性进行表征。此外,还能在扫描电镜中配置相应附件,对样品进行加热,冷却,拉伸等操作并对该动态过程中发生的变化进行实时观察。

4 扫描电镜的应用

扫描电镜以其高的分辨率,良好的景深及简易的操作等优势在材料学、物理学、化学、生物学、考古学、地矿学、食品科学、微电子工业以及刑事侦查等领域有广泛的应用。它可以对组织进行形貌分析,断口分析,元素定性和定量分析以及晶体结构分析,现将扫描电镜在各领域的具体应用总结如下。

4.1 材料学

4.1.1 纳米材料

扫描电镜可直接观察纳米材料的结构,颗粒尺寸、分布、均匀度及团聚情况,结合能谱还能对纳米材料的微区成分进行分析,确定纳米材料的组成。如图2(a)所示,为利用扫描电镜观察到的金纳米棒;图2(b)为 MnO_2 纳米线;图2(c)为 TiO_2 纳米管;图2(d)为 SiO_2 纳米球(分别由四川大学生材中心李芸焜,材料学院史丽红及梁霄提供)。

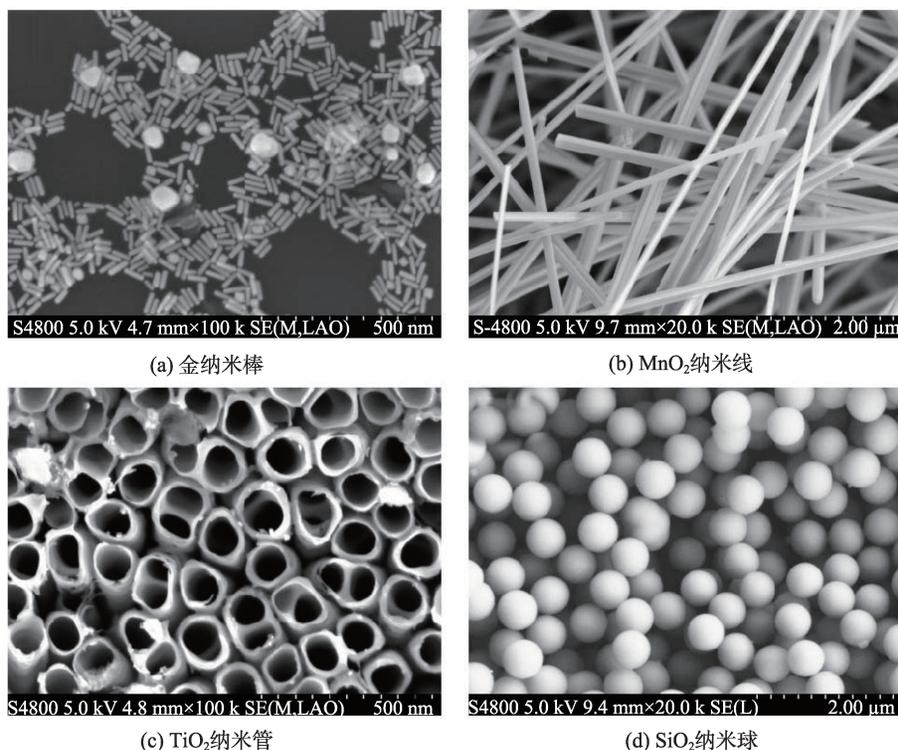


图2 纳米材料扫描电镜图

纳米材料的性质与其组成和表面形貌有很大的关系^[8],利用扫描电镜分析纳米材料,可建立起纳米材料种类、微观形貌与宏观性质之间的联系,对于改进合成条件,制备出具有优异性能的纳米材料有很重要的指导意义。

1) 文献[9]中通过改变阴离子(SDS)和阳离子(CTAB)表面活性剂的比例制备了多种形貌的 SnO_2 纳米材料。利用扫描电镜观察其微观形貌,建立起了 SnO_2 纳米材料与其气体传感性能之间的联系。

2) 文献[10]中通过水热合成法制备了多级梳状的ZnO纳米材料。通过扫描电镜观察不同 OH^- 离子浓度下制备的ZnO纳米材料结构的变化,建立起了多级梳状ZnO纳米材料的生长机理。

3) 文献[11]中通过化学气相沉积法制备了碳纳米管/ Al_2O_3 杂化结构,通过扫描电镜观察发现在给定的温度和 H_2 气比例下,制备的碳纳米管的尺度、密度、生长速度以及杂化结构随着反应腔的轴向而发生变化,以此建立的数值模拟与实验结果很好地吻合,对于指导合成多种碳纳米管结构具有重要的意义。

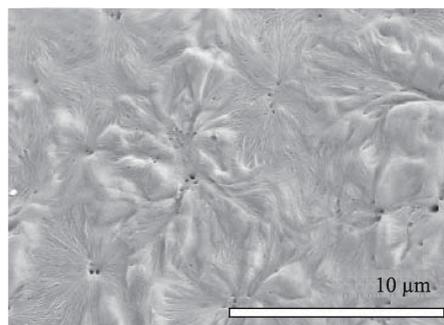
4.1.2 高分子材料

扫描电镜可直接观察高分子材料(如均聚物、共聚物及共混物)的粒、块、纤维、膜片及其制品的微观形貌,粉体颗粒及纤维等增强材料在母体中的分散情况。如图3(a)和图3(b)所示,分别为利用扫描电镜观察到的高分子滤膜表面的晶片结构及孔洞分布情况(由四川大学高分子学院吴桐提供)。

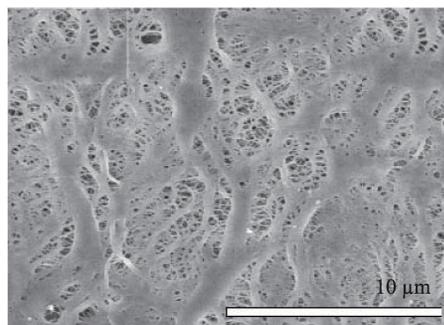
扫描电镜还能观察高分子材料在老化、疲劳、拉伸及扭转等情形下断口断裂和扩散的情况,为分析断裂的起因,断裂方式及机理提供帮助^[12]。

1) 文献[13]中利用扫描电镜对聚烯烃消光膜表面的织态结构和本体形貌进行观察,用于指导对消光膜表面织态结构的不均匀性的调控,得到高质量的聚烯烃消光膜。

2) 文献[14]中利用扫描电镜对聚乙烯(PE)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)等高分子材料填料的分散性及表面与断裂界面进行了研究,从而对研究该材料的结构和性能提供了有力的支持。



(a) 晶片结构

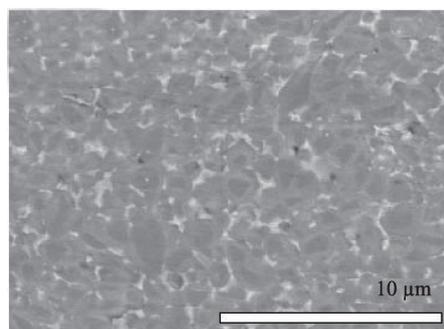


(b) 孔洞分布情况

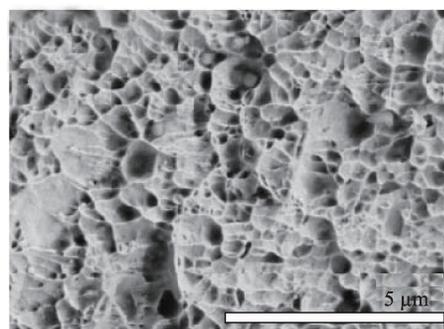
图3 高分子滤膜表面扫描电镜图

4.1.3 金属材料

1) 扫描电镜可对金属材料的微观组织(如马氏体,奥氏体,珠光体,铁素体等)进行显微结构及立体形态的分析。如图4(a)所示,为利用扫描电镜观察金属陶瓷表面的星环结构。



(a) 金属陶瓷



(b) 不锈钢断口

图4 金属材料扫描电镜图

2) 扫描电镜可对金属材料表面的磨损、腐蚀以及形变(如多晶位错和滑移等)进行分析;对金属材料断口形貌进行观察,揭示断裂机理(解理断裂,准解理断裂,韧窝断裂,沿晶断裂,疲劳断裂);对钢铁产品质量和缺陷分析(如气泡,显微裂纹及显微缩孔)。如图4(b)所示,为利用扫描电镜观察到的不锈钢断口的韧窝结构(由四川大学制造学院唐俊提供)。

文献[15]中利用扫描电镜对3种不同WC晶粒度的硬质合金的表层以及无梯度的合金芯部微观形貌,硬质合金非梯度的合金芯部以及硬质合金梯度表层的断口形貌进行了分析,结合XRD和硬度计研究了WC粒度对梯度硬质合金组织和性能的影响以及不同WC粒度梯度硬质合金的断裂方式。

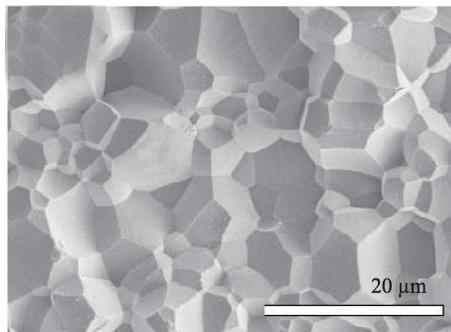
3) 扫描电镜结合能谱可以测定金属及合金中各种元素的偏析,对金属间化合物相、碳化物相、氮化物相及钨化物相等进行观察和成分鉴定;对钢铁组织中晶界处夹杂物或第二相观察以及成分鉴定;对零部件的失效分析(如畸变失效,断裂失效,磨损失效和腐蚀失效)以及失效件表面的析出物和腐蚀产物的鉴别^[16]。此外,对于抛光后的金属样品,扫描电镜结合EBSD可进一步对晶体结构进行解析。

4.1.4 陶瓷材料

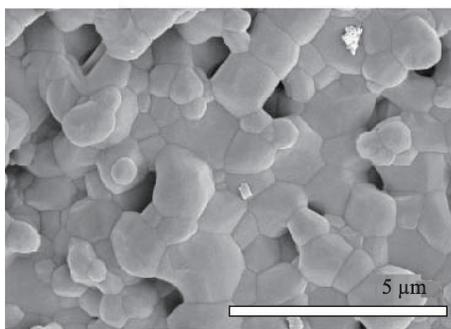
扫描电镜可对陶瓷材料的原料,成品的显微结构及缺陷等进行分析,观察陶瓷材料中的晶相,晶体大小,杂质,气孔及孔隙分布情况,晶粒的取向以及晶粒的均匀度等情况。如图5(a)和图5(b)所示,分别为烧结后的YAG陶瓷和生物陶瓷的扫描电镜图(分别由四川大学物理学院杨茂和生材中心李向峰提供)。利用该图可对陶瓷表面的晶粒尺度进行统计,观察晶粒均匀程度以及气孔分布情况。

1) 文献[17]中通过简单的制粉技术和真空烧结工艺制备了Mn:MgAl₂O₄透明陶瓷,利用扫描电镜观察了未掺杂及掺杂不同浓度的Mn²⁺离子的Mn:MgAl₂O₄陶瓷的结晶完整度,晶粒尺度,晶内气孔及晶界宽度等情况,发现了获得较好光学透过率的Mn:MgAl₂O₄陶瓷的最高掺杂浓度为10 at%。

2) 文献[18]中利用扫描电镜对氧化铝基和莫来石基的高温氧化物陶瓷材料的表面、断面形貌以及陶瓷材料中各相物质相互应力作用进行分析,为研究复相陶瓷材料的相变机理及复合机理提供了科学依据。



(a) YAG陶瓷



(b) 生物陶瓷

图5 陶瓷材料扫描电镜图

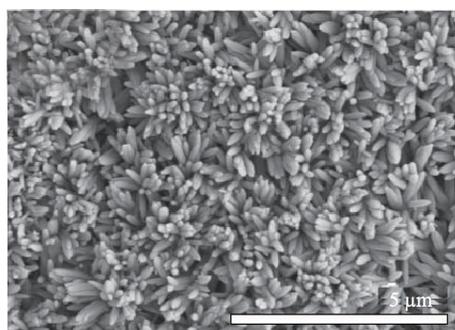
4.1.5 生物材料

扫描电镜可用于观察生物活性钛材料和生物陶瓷材料以及这些材料经过特殊处理后的表面形貌以及羟基磷灰石或细胞在这些材料表面的生长情况。此外,扫描电镜还能用于观察水凝胶的孔洞结构,胶原的纤维结构,人工骨的孔分布情况以及磁性生物显影材料的尺度及包覆情况等,为改善合成工艺,制备性能优异的生物材料提供了依据。如图6所示,显示的是钛片经不同方法处理后在表面生长羟基磷灰石的情况(由四川大学生材中心陈宏杰提供)。

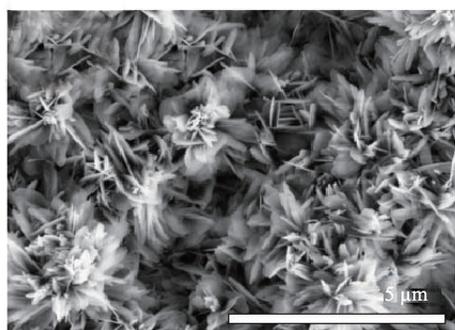
1) 文献[19]中研究了酸碱、碱热和阳极氧化处理后的生物活性钛材料。用扫描电镜观察了材料的表面形貌以及金黄色葡萄球菌和大肠杆菌在材料表面的形态和粘附情况,研究了细菌的粘附和增殖与材料表面形貌的关系,并挑选出有较好的抑菌性能的生物活性钛材料。

2) 文献[20]中利用涂胶技术结合微球烧结和气体发泡方法分别制备了羟基磷灰石、双相磷酸钙和磷酸钙生物陶瓷材料,利用扫描电镜分别观察了这三种材料的表面形貌、颗粒尺寸和孔分布,并进一步观察了浸泡模拟体液后类骨磷灰石的生长情况以及骨髓间充质干细胞在这三种

材料表面的生长情况，为研究这三种材料的表面性质，生物相容性和生物活性提供了直接的依据。

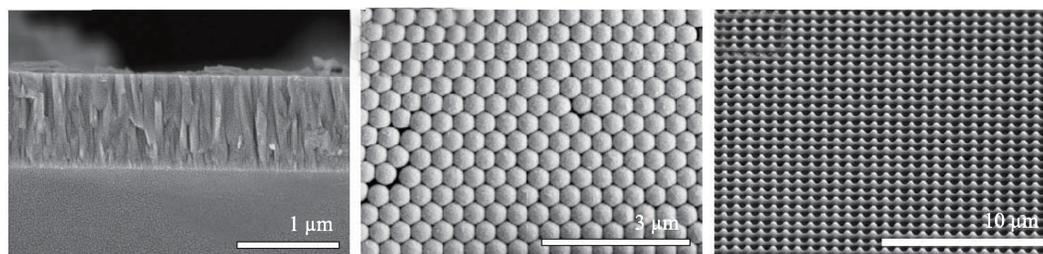


(a) 棒状羟基磷灰石



(b) 片状羟基磷灰石

图6 羟基磷灰石扫描电镜图



(a) 硅表面生长的TiN薄膜断面

(b) 光刻胶表面的聚苯乙烯微球

(c) 硅基底上的光纳米阵列

图7 不同材料扫描电镜图

3) 文献[23]中利用反应气体脉冲溅射制备了TiN薄膜，通过周期性的改变 N_2/Ar 混合气体的比例制备的TiN薄膜在扫描电镜下观察为Ti相和TiN相构成的多层及复合分级结构，且Ti相比上TiN相的厚度可通过控制 N_2 气流速的波动来有效调节，为控制薄膜的微结构提供了理论及技术支持。

4.3 化学

1) 文献[24]中利用 HF 、 H_2SO_4 、 $NaNO_2$ 组成的混合腐蚀液对硅粉进行化学腐蚀处理，利用扫描电镜观察不同腐蚀时间下得到的多孔硅的表面形貌及孔隙情况，在2h腐蚀时间下得到的腐蚀均

4.2 物理学

通过对材料表面进行处理(如沉积不同成分、形貌和厚度的膜层，对表面进行光刻蚀等)能有效改善材料的硬度、光学等物理性能。利用扫描电镜可观察镀膜的表面形貌、断口膜层的形貌以及测量膜厚；可观察样品经光刻蚀后的表面形貌等。如图7所示分别展示了硅表面生长的TiN薄膜断面，光刻胶表面的聚苯乙烯微球和硅基底上的光纳米阵列结构的扫描电镜图(分别由四川大学物理学院彭明进、刘伟及电子科技大学郭小伟提供)。

1) 文献[21]中利用扫描电镜观察了CdS/CdTe断面，结合光谱结果讨论了氧对CdS/CdTe界面互扩散的影响。表明了CdS薄膜制备气氛中氧分压的变化将影响器件在500~600 nm波长范围内的光谱响应。

2) 文献[22]中利用胶体聚苯乙烯微球自组装、反应离子刻蚀，金属沉积以及随后的剥离工艺相结合的方法制备了纳米金属孔的滤色镜。利用扫描电镜观察和测量了刻蚀后的PS球的周期和尺寸，以及在银膜上制备的纳米孔阵列的周期和尺寸，为研究孔和周期尺寸与透射光谱之间的关系提供了方便。

匀的多孔硅具有较强的荧光发射性质并以此建立了检测 Ag^+ 的新方法。

2) 文献[25]中研究了MS Coat和极固灵两种制剂对牙本质的脱敏效果，利用扫描电镜观察两种制剂作用后的牙本质小管的表面和截面的堵塞情况，为临床上选择脱敏剂提供了参考。

4.4 生物学

扫描电镜可用于观察生物的精微结构及复杂的立体表面形态。它可对藻类、花粉表面沟纹的精微结构，癌细胞的表面变化，细胞、细菌在生命周期中的表面变化进行观察^[26]。此外，扫描电

镜与现代冷冻技术的结合(通过样品冷冻断裂暴露不同层面,如膜之间,细胞之间和细胞器之间的结构)可以获得生物样品完整的剖面,对研究一些生物样品的内部结构提供了支持。如图8所示,

分别是利用扫描电镜观察河床上的藻类,鼠的红细胞以及在胶原表面上生长的细胞的形貌图(分别由四川大学建环学院姚晨和生材中心郭春花提供)。

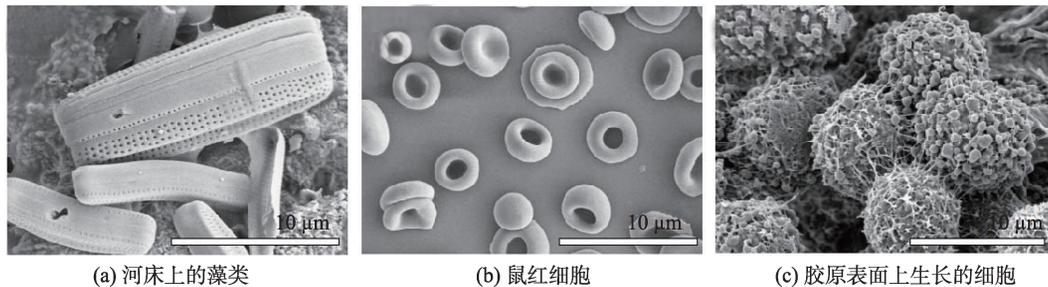


图8 不同生物样品扫描电镜图

1) 文献[27]中利用扫描电镜观察了16份来自11个国家的野豌豆属牧草种子的花粉形态,探讨了其系统分类学特征,为揭示野豌豆属种子资源的遗传多样性奠定了基础。

2) 文献[28]中利用扫描电镜观察了蝗总科3科3属7种蝗虫下颚须感受器的种类和数量,发现不同的蝗虫所具有的感受器的种类和数量不同,这就为下颚须感受器的种类可作为蝗虫科级分类的一种依据提供了有利的证据。

4.5 考古学

扫描电镜结合能谱可以对出土的文物进行无损的显微结构分析和化学成分鉴定。它可对金币、银币和铜币表面进行分析,确定其金、银和铜纯度及含量,为分析当时的铸造工艺提供证据;可分析古字画、窑胎釉所用颜料的种类和配比,为进一步判断其来源和破解制备工艺提供参考;可分析织物,判定织物材质,织法工艺,为织物的保护和修复提供有力帮助。

1) 文献[29]中对四川大学博物馆不同印刷时段的线装书进行病害研究,利用扫描电镜观察了这些线装书纤维表面出现的孔洞,纤维断裂及填料情况,再结合能谱分析了填料的成分,为观察纸张表面破坏情况,分析纸张不同破坏程度的原因,研究纸张的制备工艺等提供了有力的支持。

2) 文献[30]中利用场发射扫描电镜和超景深显微镜对一副清代扇页裱件表面的霉菌和纸纤维表面形貌进行了分析,明确了污染书画上的霉菌为毛壳菌,并从微观角度分析霉菌对纸张纤维结构造成的破坏情况。这为后期文物的修复和保存提供了一定的参考价值。

4.6 地矿学

1) 扫描电镜可对矿物的表面形貌、结构及成分进行分析。利用扫描电镜观察矿物的微区变化,可以为分析矿物的成岩环境和历史演化提供证据;可观察粘土矿物的形态、分布、性质及共生组合,从而为分析粘土矿物的成因和地球化学背景提供依据;可分析储集岩的矿物成分、结构构造、孔隙类型及成因,对储层优劣提供评价^[31]。

2) 扫描电镜可对岩土的成分、结构及坚固性进行研究。它可用于观察宇宙尘、陨石和月岩的形态特征、结构,从而为推断成因、了解宇宙提供有效信息;可研究古微生物化石的形状、排列方式,为确定地质年代、地层形成的古地理环境提供资料^[32]。

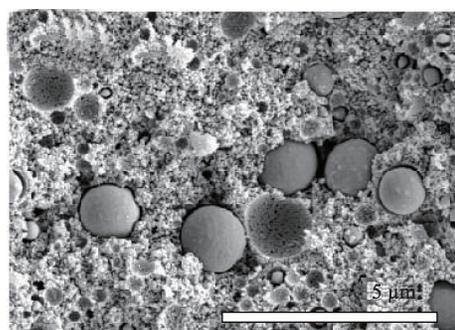
如图9所示,展示了混凝土以及砂岩的扫描电镜图和砂岩的能谱图(插入)(分别由四川大学建环学院和中科院成都山地所提供)。从图中9(a)中可以看出混凝土中各组分均匀混合。从图9(b)中可以看出砂岩典型的片层结构,结合能谱确定砂岩的组成,为未知岩石种类的确定提供了方法。

4.7 食品科学

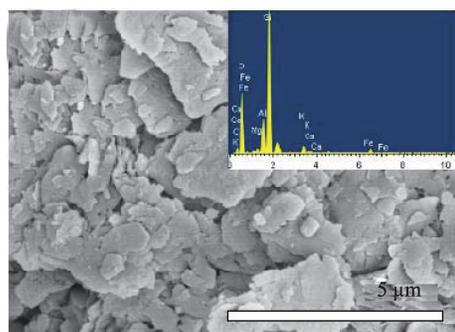
1) 文献[33]中研究了蜂胶对鸡蛋的保鲜作用,利用扫描电镜观察了蜂胶处理后的鸡蛋表皮的超微结构,发现蜂胶处理后的鸡蛋表皮断层结构更为紧密,蜂胶的渗入填充阻止了物质的交换,从而对鸡蛋具有保鲜作用,为研究蜂胶对鸡蛋保鲜的原因提供了直接的依据。

2) 文献[34]中采用不连续十二烷基磺酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳方法,对不同品种的大豆中

蛋白质的亚基含量比例(7S/11S)进行了测定,利用扫描电镜观察蛋白制成的凝胶形貌,得出品种差异对大豆蛋白凝胶性的影响显著的结论。



(a) 混凝土



(b) 砂岩以及能谱图(插入)

图9 不同岩土扫描电镜图

4.8 微电子工业

半导体器件的性能和稳定性与其表面的微观状态有关系。利用扫描电镜可以对半导体二极管,三级管,集成电路或液晶显示器等进行失效分析,观察微观形貌,寻找和观察失效点、缺陷点,精确测量器件的微观几何尺度和表面点位分布等,结合能谱还能对污染物的元素进行分析。这有利于分析失效原因,改进制备工艺,采取有效措施来防止事故的发生。如图10所示,是利用扫描电镜观察到的光栅的周期性结构(由电子科技大学郭小伟提供)。利用扫描电镜图可对光栅的周期性间距进行测量,观察光栅上是否有缺陷位点。

4.9 刑事侦查

扫描电镜在刑事侦查中的应用具有用量少且不破坏检材的特点,可用于射击残留物,爆炸残留物,油漆,涂料,文书,金属附着物,刮擦/撬压痕迹,毒物,生物类物证(土壤,植物组织,纤维,骨头,组织及毛发等)的检测^[35]。通过对这些物证的微观形貌观察和比对,以及结合能谱对其

成分进行分析,可以为侦查提供线索,也可为证实犯罪提供科学的依据。

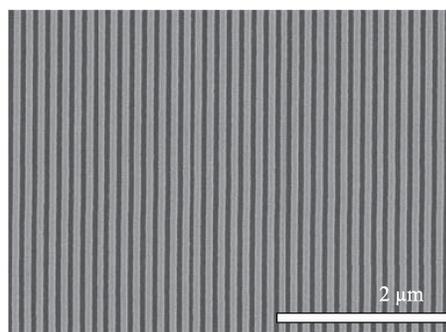


图10 光栅的扫描电镜图

5 结束语

扫描电镜是利用一束细聚焦的电子束轰击试样表面,通过检测电子与试样相互作用产生的信号对样品表面的形貌、成分及晶体结构等进行观察和分析。它是目前应用得非常广泛的一种样品微观形貌的表征手段,已广泛应用于材料学、物理学、化学、生物学、考古学、地矿学、食品科学、微电子工业以及刑事侦查等领域并促进了学科的发展。随着现代科学技术的进步,其他种类的扫描电镜(如低压扫描电镜,环境扫描电镜等)相继出现,它们可以对不导电的样品,生物样品,含水样品进行直接观察,极大地保留了试样的真实性。此外,扫描电镜与其他一些设备(如显微热台,显微冷台以及拉伸台等)的组合,可用于观察材料在加热、冷冻以及受力情况下微观结构上的变化,进一步扩展了扫描电镜的应用范围。新型扫描电镜以及扫描电镜与其他设备组合而具有的新型分析功能将在新材料,新工艺的探索和研究方面发挥重要作用。

参考文献

- [1] 工业和信息化部电子第五研究所组. 扫描电镜和能谱仪的原理与实用分析技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [2] 彭昌盛. 扫描探针显微技术理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] 焦汇胜, 李香庭. 扫描电镜能谱仪及波普仪分析技术[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 2011.
- [4] 金嘉陵. 扫描电镜分析的基本原理[J]. 上海钢研, 1978(1): 31-47.
- [5] 曾毅. 扫描电镜和电子探针的基础及应用[M]. 上海:

- 上海科学技术出版社, 2009.
- [6] 张新言, 李荣玉. 扫描电镜的原理及 TFT-LCD 生产中的应用[J]. 现代显示, 2010, 21(1): 10-15.
- [7] 陈木子, 高伟建, 张勇, 等. 浅谈扫描电子显微镜的结构及维护[J]. 分析仪器, 2013(4): 91-93.
- [8] XIA Y, YANG P, SUN Y, et al. One-dimensional nanostructures: synthesis, characterization, and applications[J]. *Advanced Materials*, 2003, 34(22): 353-389.
- [9] FIROOZ A A, MAHJOUB A R, KHODADADI A A. Highly sensitive CO and ethanol nanoflower-like SnO₂ sensor among various morphologies obtained by using single and mixed ionic surfactant templates[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2009, 141(1): 89-96.
- [10] ZHANG Y, XU J, XIANG Q, et al. Brush-like hierarchical ZnO nanostructures: synthesis, photoluminescence and gas sensor properties[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(9): 3430-3435.
- [11] HE D, LI H, BAI J. Experimental and numerical investigation of the position-dependent growth of carbon nanotube - alumina microparticle hybrid structures in a horizontal CVD reactor[J]. *Carbon*, 2011, 49(15): 5359-5372.
- [12] 邹文俊. 电子显微镜在 高分子研究中的应用[J]. 河南工业大学学报(社会科学版), 1996(1): 14-17.
- [13] 陈晓勇, 向明. 聚烯烃消光膜消光均匀性的控制[J]. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(11): 26-29.
- [14] 李文臣, 温冬梅. 高分子材料微观形态结构的扫描电镜研究[J]. 弹性体, 2014, 24(6): 78-80.
- [15] 唐俊, 熊计, 郭智兴, 等. WC 粒度对梯度硬质合金组织和性能的影响[J]. 硬质合金, 2015, 32(6): 364-371.
- [16] 石祝竹, 莫煜. 扫描电镜(SEM)在失效分析中的应用[J]. 装备制造技术, 2011(11): 142-144.
- [17] 王学军, 卢铁城, 孙月峰. 高掺杂浓度下 Mn: MgAl₂O₄ 透明陶瓷的形貌分析[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2007, 44(3): 721-724.
- [18] 张庆军. 高温氧化物陶瓷材料显微结构扫描电镜分析[J]. 电子显微学报, 2001, 20(4): 332-333.
- [19] 甘露, 杨帮成, 张兴栋. 细菌在生物活性钛表面的粘附行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(7): 1242-1245.
- [20] LI X, WANG M, DENG Y, et al. Fabrication and properties of Ca-P bioceramic spherical granules with interconnected porous structure[J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2017, 3(8): 1557-1566.
- [21] 夏庚培, 冯良桓, 蔡亚平, 等. 氧对于在 Ar/O 氛围下用近空间升华法制备的 CdS 薄膜的影响[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6465-6470.
- [22] LI S, REN L, YANG Z, et al. Fabrication of nano metallic holes for color filters based on a controllable self-assembly of polystyrene spheres[J]. *Microelectronic Engineering*, 2014, 113(1): 143-146.
- [23] YANG J J, ZHANG F F, WAN Q, et al. TiN films fabricated by reactive gas pulse sputtering: a hybrid design of multilayered and compositionally graded structures[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 389: 255-259.
- [24] 熊小莉, 薛康, 尤超, 等. 化学腐蚀法制备荧光多孔硅及对 Ag⁺ 的检测[J]. 发光学报, 2016, 37(6): 662-668.
- [25] 李娜, 朱立江, 王香兰, 等. 两种脱敏剂封闭牙本质小管的扫描电镜观察[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(38): 6150-6154.
- [26] 何大澄, 翟中和. 扫描电镜及其在生物学研究中的应用[J]. 生物学通报, 1980(2): 41-43.
- [27] 刘鹏, 马利超, 王宇, 等. 16 种野豌豆属植物花粉形态的扫描电镜观察[J]. 草业学报, 2015, 24(1): 107-114.
- [28] 洪芳, 陈婉, 肖波, 等. 蝗总科 7 种昆虫下颚须感受器的扫描电镜观察[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2010, 31(3): 81-85.
- [29] 罗雁冰, 张秀娟. 四川大学博物馆部分馆藏线装书病害调查与研究[J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(3): 83-90.
- [30] 杨娟. 一幅霉变书画的扫描电镜分析[J]. 电子显微学报, 2015(5): 438-442.
- [31] 刘伟新, 史志华, 朱樱, 等. 扫描电镜/能谱分析在油气勘探开发中的应用[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 341-343.
- [32] 于丽芳, 杨志军, 周永章, 等. 扫描电镜和环境扫描电镜在地学领域的应用综述[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学与医学版), 2008(1): 54-61.
- [33] 霍君生, 邓春景. 蜂胶对鸡蛋高温贮藏生理及蛋壳表皮超微结构的影响[J]. 河北农业大学学报, 1994(3): 103-106.
- [34] 石彦国, 程翠林, 朱秀清, 等. 品种差异对大豆蛋白凝胶性的影响[J]. 中国粮油学报, 2005, 20(3): 58-60.
- [35] 时巧翠, 严恺伦, 林顺雷, 等. 扫描电镜/能谱仪在刑事技术中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(10): 32-35.

编辑 肖忠琴