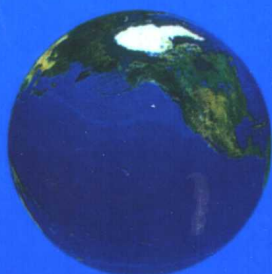


地球科学现代测试技术

王汝成 翟建平 陈培荣 凌洪飞



南京大学出版社

地球科学现代测试技术

王汝成 翟建平 陈培荣 凌洪飞

南京大学出版社

书 名 地球科学现代测试技术

著 译 者 王汝成 翟建平 陈培荣 凌洪飞

责任编辑 恽玲舫

装帧设计 尹茗

责任校对 王玉华

出版发行 南京大学出版社

(南京汉口路 22 号南京大学校内 邮编 210093)

印刷 扬中市印刷厂

经销 全国各地新华书店

开本 787×1092 1/16 印张 11 字数 274 千

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月第 1 次印刷

印数 1000 册

定价 17.00 元

ISBN 7-305-03326-X/P·118

声明:(1) 版权所有,侵权必究。

(2) 本版书若有印装质量问题,本社发行部负责退换。

发行部订购、联系电话: 025-3592317

序

地球科学的发展已突破定性描述的研究范畴,而越来越重视定量数据的运用。在这种形势下,高精分析仪器在地学领域的应用已相当普遍并日显其绝对的重要性。由于历史原因,在我国传统的地质学教学体系内,诸如“仪器分析”一类的课程并未受到应有的重视。事实上,现代科学研究已越来越强调科研人员对科学仪器的掌握,以获得最具科学价值的第一手资料。在此情况下,地球科学系领导认识到在本科生教学中加强实验技术教学的重要性,并首推《地球科学现代测试技术》作为此类第一门课程,并将此列为地质学基础理论人才教学基地班的主干课程之一。

作为一门新开课程,选择任课老师和编写教学讲义(包括教学大纲)是极其重要的。负责担任《地球科学现代测试技术》课程的主讲教师,也是这本教材的作者,都是具有博士学位的年轻教师。他们既是相关研究领域的骨干教师,又熟悉所掌握的仪器。他们根据最新的资料,从地球科学研究人员的角度,分别从仪器的基本工作原理、基本操作方法、尤其在仪器的基本应用三方面入手,编写简明、实用的讲稿,既有经典理论基础,又加强了80年代后期至90年代初各仪器的最新发展动向,尤其是新功能的开发及其在相关领域的最新重要应用及成果。这本教材与国内已出现的资料相比,具有明显的综合性、先进性和实用性。

《地球科学现代测试技术》从地质学基地班开始,现已扩大到矿物岩石材料专业的本科教学内容。我希望这门新开设的课程不断改进,形成有鲜明特色的一门课程,并对培养新型的地球科学研究人才起到推动作用。

王德滋

前 言

电子探针、同位素质谱技术、等离子光谱技术及流体包裹体分析技术是地球科学研究中最常见、也是最重要的一些现代测试技术,它们在矿物学、岩石学、矿床学、地球化学等研究中起着十分重要的作用,同时也是岩石矿物材料研究中不可缺少的重要手段,因而也可以说,这些测试技术的基本原理和主要应用是地质学专业学生所必须具备的专业知识。按照南京大学地球科学系地质学基础理论人才培养教学基地本科生教学大纲的安排,在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的支持下,选择重点实验室在 90 年代购进的最新大型仪器为教学实验设备,并请负责这些仪器的教师从 1996 年开始为地质学专业学生开设《地球科学现代测试技术》课程。随后,每学期分别给岩石矿物材料专业和地质学专业轮流开课,迄今已有四个学期。由于国内外并无现成的适用于地质系专业教学的现代分析技术方面的教材,因此,任课教师在广泛收集国内外相关领域的最新动向和研究成果的基础上,根据自己的实践经验,结合本课程的教学宗旨(即:使学生理解仪器的基本理论、掌握仪器的基本操作和熟悉仪器的基本应用),写出了“《地球科学现代测试技术》讲义”。

南京大学出版社和教务处为鼓励广大教师多出好教材,特设立了南京大学教材出版基金。“《地球科学现代测试技术》讲义”荣幸地获得了这一基金,使教材有机会正式出版。因此,本教材得以出版,首先要感谢南京大学出版社和教务处。

《地球科学现代测试技术》课程已连续为地质学基地班和矿物岩石材料专业学生开设了四次。本教材是在原先的《地球科学现代测试技术》讲义的基础上,经过反复修改而成的。教材共分四章,分别讲述教学过程中涉及的四种仪器,即电子探针、等离子发射光谱仪、流体包裹体测温设备和气体同位素质谱计,它们均隶属于南京大学成矿作用国家重点实验室(也是本课程的实验基地)。四章分别由王汝成、翟建平、陈培荣和凌洪飞执笔撰写,由王汝成最后统稿和定稿。上述四个相关实验室的其他同志也在教材编写和课程开设过程中给予了许多帮助,他们是陈小明、张文兰、赖鸣远、袁丽雯、李振敏、黄耀生。需要说明的是,在《地球科学现

代测试技术》开设之初,还有方金满副教授参与一起教学,主讲“矿物差热分析”部分,由于受篇幅所限等原因,这部分内容未能列入本教材中。

本教材的作者特别要感谢王德滋院士,他对本教材的编写给予自始至终的关心,并欣然应允为本书作序。

作者要感谢地球科学系领导,他们为教材的出版给予了各方面的支持。

作者还要感谢成矿作用国家重点实验室主任马东升教授对《地球科学现代测试技术》课程的开设和本教材的编写及出版等方面所给予的关心和支持。

由于作者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,也可能未能将相关领域的重要内容全部写入书中,热诚希望读者给予批评指正;同时,有关分析仪器也在飞速发展,这些均容作者在今后不断补充和进一步完善。

目 录

第一章 电子探针分析原理	1
第一节 微电子束分析技术及其发展历史	1
一、概述	1
二、电子探针微区分析技术的发展史	1
三、扫描电子显微镜简介	3
四、电子探针分析特点	4
五、电子探针的分析功能	4
第二节 电子探针分析的物理基础	6
一、电子与固体的相互作用	6
二、电子探针的基本原理	10
第三节 电子探针仪器结构	11
一、电子光学系统	11
二、X射线谱仪	14
三、光学显微镜系统	17
四、样品室	17
五、电子讯号探测系统	17
六、真空系统	17
七、计算机与自动控制系统	18
第四节 样品制备	20
第五节 电子探针定性分析	20
一、能谱定性分析	20
二、波谱定性分析	22
第六节 电子探针定量分析	25
一、电子探针元素定量分析的基本原理	25
二、定量分析数据的预处理	25
三、ZAF修正	26
四、定量分析的技术问题	27
五、工作条件的选择	27
六、X射线分析中的精度和灵敏度	28
七、轻元素的电子探针分析	30

第七节 电子探针分析选用标样	36
一、标样的种类	36
二、天然矿物标样的制备	36
三、选用标样的标准	37
第八节 电子探针线分析	37
第九节 电子探针面分析与相分析	38
一、普通面扫描	38
二、数字化成分成像	39
三、相分析	39
第二章 电感耦合等离子发射光谱分析	43
第一节 发射光谱分析的基本原理	43
一、光谱和光谱分析	43
二、原子结构和原子光谱	45
三、发射光谱分析的内容	47
第二节 ICP 概述	47
一、等离子体的定义	47
二、等离子体发射光源的种类	48
三、等离子体的形成和主要物理特性	49
四、ICP 的激发机理	51
五、ICP 分析仪器装置简介	53
第三节 ICP 光源装置	54
一、ICP 炬管	54
二、气体控制系统和高频电源	56
三、溶液进样装置	57
四、ICP 炬焰最佳观测高度	58
第四节 ICP-AES 分光装置	59
一、光谱仪的基本构成和特性	59
二、衍射光栅	61
三、ICP-AES 常用光谱仪	62
第五节 ICP-AES 测光装置	64
一、照相检测法	64
二、光电倍增管工作原理和主要特性	64
三、光电直读分析法基本关系式	66
四、光电信号测量回路	66
五、计算机自动控制和数据处理系统	67
第六节 ICP-AES 分析方法	68
一、ICP 定量分析方法	68
二、ICP 分析灵敏度、检出限和再现性	69
第七节 ICP-AES 的样品前处理	70

一、固体无机试样的分解	70
二、有机物的分解	71
三、分离和富集	71
第八节 ICP-AES 应用简述	72
一、地球化学样品的测定	72
二、环境样品分析	73
三、生物试样(动物或植物)分析	74
第九节 ICP-MS 分析及应用简介	74
一、ICP-MS 原理与仪器结构	74
二、ICP-MS 的应用实例	77
第三章 流体包裹体研究方法	79
第一节 概述	79
一、一般特征	79
二、研究历史与现状	79
三、研究目的和意义	80
第二节 包裹体的成因与分类	80
一、均匀捕获和不均匀捕获	81
二、捕获后的变化	82
三、成因分类和状态分类	86
第三节 包裹体样品的选择和制备	90
一、样品的选择	90
二、颗粒载片的制备	91
三、抛光片的制备	92
四、显微测温样品的制备	92
五、爆裂法测温样品的制备	92
六、成分分析样品的制备	92
第四节 包裹体的显微镜下观察与鉴定	93
一、放大倍数与观察技巧	93
二、包裹体中相的识别	93
三、包裹体特征的记录和描述	96
第五节 温度的测定方法	98
一、均一法	98
二、爆裂法	110
三、淬火法	113
第六节 组分和盐度的估测方法	114
一、冷冻法	114
二、子矿物溶解法	119
三、密度测定	119
第七节 压力的估算	119

一、均一状态下流体的蒸气压力	120
二、流体等容线 + 独立的地质温度计	121
三、等容线相交	121
四、石盐矿物的溶化	121
五、 CO_2 和 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体包裹体测压	124
第四章 同位素质谱分析	128
第一节 同位素的概念	128
第二节 质谱学	129
一、质谱仪器发展简史	129
二、质谱仪器的应用概述	130
三、质谱仪器的组成	130
四、质谱计分析系统	130
五、有关质谱计性能的几个概念	133
六、同位素比值测定方法	134
第三节 稳定同位素样品制备与质谱分析及应用	135
一、样品制备	135
二、稳定同位素样品质谱分析	138
第四节 稳定同位素地质应用	140
一、稳定同位素分馏的概念	140
二、水圈和大气圈中的氢、氧同位素	142
三、岩石圈的氢、氧同位素	144
四、碳同位素	147
五、硫同位素	150
第五节 放射性同位素和放射成因同位素样品制备、质谱分析及其应用	152
一、放射性衰变的几种方式	152
二、衰变公式	153
三、 Rb-Sr 、 Sm-Nd 同位素样品的制备与质谱分析	154
四、 Rb-Sr 、 Sm-Nd 同位素在地球科学中的应用	159

第一章 电子探针分析原理

第一节 微电子束分析技术及其发展历史

一、概述

电子束微区分析技术,指的是以细聚焦电子束为激发源,进行物质组分和物体表面形态分析的物理分析测试手段。代表性仪器有电子探针和电子显微镜。

电子探针是电子探针 X 射线显微分析仪(Electron Probe X-ray Micro-Analyzer, EPMA)的简称,顾名思义,电子探针就是运用电子所形成的探测针(细电子束)作为 X 射线的激发源来进行显微 X 射线光谱分析的设备。电子显微镜(Electron Microscope)包括扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)和透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)。这两种仪器都具有化学组分和形态分析的功能,只不过是它们的性能各有所侧重。电子探针主要侧重于元素的定性、定量分析方面的物质组分的研究;而电子显微镜则侧重于物体表面形态的分析和研究。

二、电子探针微区分析技术的发展史

16 世纪光学显微镜的问世使人们能够比较有效地研究微观世界。19 世纪 40 年代开始,偏光显微镜成为地质学和矿物学家手中的强大武器,从而使岩石学、矿物学乃至整个地学领域的面貌焕然一新,一门以偏光显微镜研究矿物和岩石特性的学科——光性矿物学即应运而生。

众所周知,光学显微镜是通过放大被观察物体来提高分辨率的,但其最高分辨率只有 2000 Å 左右,与此相对应的最高放大倍数为 1500 倍。显然,这对于更深入地研究奥秘无穷的物质微观世界是不够的。

本世纪 30 年代出现的电子光学技术,使人们有可能获得聚焦的电子束。世界上第一个描述电子显微镜原理的是 Knoll(1935),描述电子探针分析原理的是美国无线电公司实验室的 Hillier(1942),他提出了将聚焦的电子束作为发射 X 射线光谱仪的激发源,采用照相法来记录微粒物体发射 X 射线光谱及其强度,但它未能发展成为商品化仪器。1949 年,法国巴黎大学的 R.Castaing 在实验室首先将电子显微镜与 X 射线光谱仪组合改造成世界上第一台电子探针(图 1-1)。他利用静电透镜使电子束聚焦,聚焦电子束直径约 1 μm。1951 年他利用电磁透镜聚焦制造出第二台电子探针。

至此,电子探针经历了四个发展阶段:

第一阶段(1949~1958),为实验室研制阶段;

第二阶段(1958~1973),为电子探针性能初步定型前商品化阶段;

第三阶段(1973~1985),为电子探针性能综合发展阶段;

第四阶段(1985~至今),为电子探针分析电子计算机化阶段。

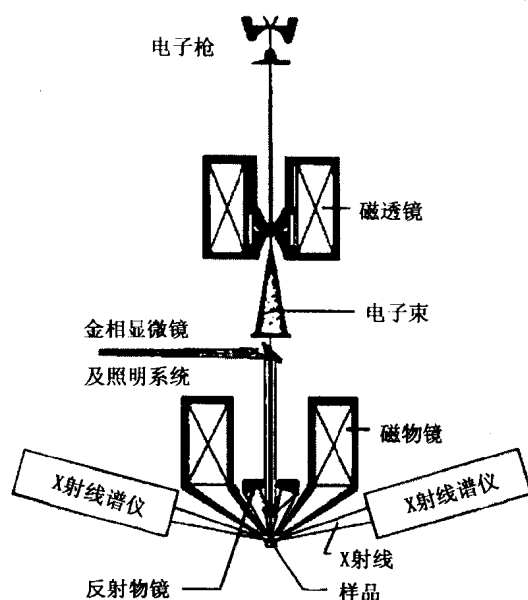


图 1-1 电子探针微束分析仪结构示意图
(据 Casting, 1960)

在第一阶段,有法国、美国、英国、苏联等国分别在实验室研制出了电子探针。除法国外,苏联在 1953 年制成一台 X 射线显微分析仪,1955 ~ 1956 年英国和美国也制成实验型仪器。这一阶段主要是指对仪器的试制以及成型于实验室的电子探针。这一阶段的仪器一般只能作电子束定点分析,不能扫描,元素分析范围为周期表上的 $^{12}\text{Mg} \sim ^{92}\text{U}$,准确定量也有困难。

1958 年,法国 Cameca 公司研制成功世界上第一台电子探针商品化仪器 Cameca MS85 型电子探针,1964 年该公司又在原基础上改进生产了 MS-46 型电子探针,这一时期,日本电子公司(JEOL)、日本岛津公司(Shimadzu)、日本日立公司(Hitachi)、英国剑桥公司(Cambridge)、德国西门子公司(Siemens)也相继生产出各种类型的电子探针。

这一时期生产的电子探针主要性能为:电子束束径 $0.1\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$,元素分析范围为 $^5\text{B} \sim ^{92}\text{U}$,一般仪器配有 2 ~ 4 道波谱仪和背散射电子探测器。1965 年以后,我国先后引进了 20 台 ~ 30 台电子探针,主要是日、法、英产品。

本世纪 70 年代以来,电子探针微区分析技术向多功能、综合性仪器方面发展。除了成分分析外,也可以观察形貌,分辨率可达 100Å ,可同时装有能谱仪和波谱仪。主要代表性仪器有 Camebax SX20, JEOL JXA733。这一时期,世界上各国厂家在发展仪器的综合性能、提高仪器的性能指标的基础上,提高仪器定性分析的准确性、定量分析的精度和速度。此阶段仪器性能:探针电流: $10^{-12}\text{A} \sim 10^{-5}\text{A}$,SEI 分辨率 $< 10\text{nm}$,最好可达 6nm ,分析元素: $^5\text{B} \sim ^{92}\text{U}$,放大倍数 20 万 ~ 15 万。

80 年代以来,电子探针的发展方向是操作计算机化,广泛使用计算机工作站,采用友好用户操作界面,可视性好,窗口式工作方式,如 Cameca SX50, JXA8600, JXA8800, JXA8900。图 1-2 为日本 JEOL 公司生产的 JXA 8800M 型电子探针。此外,由于大晶面间距的分光晶体的应用,使电子探针可测元素发展到包括 ^4Be 在内的超轻元素。放大倍数可至 30 万倍,二次电子图像分辨率为 6nm ,并且开始装置电子衍射系统。法国 Cameca 公司生产的 SX50 型电子探针

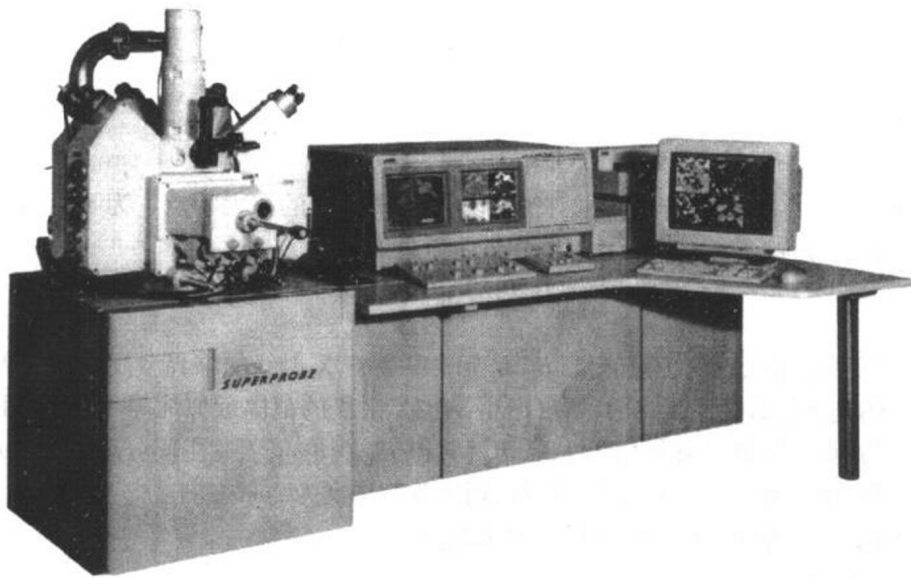


图 1-2 日本 JEOL 公司制造的 JXA8800M 型电子探针

配备 4 道波谱仪和 1 道能谱仪,物镜内装有同轴光学显微镜,可以随时观察分析区域。

我国从 60 年代初开始陆续引进一定数量的电子探针和扫描电镜。与此同时,也开始了仪器的研制工作,并于 1965 年初步研制成功我国第一台电子探针。

三、扫描电子显微镜(scanning electron microscope)简介

扫描电子显微镜的出现要比电子探针早得多,可以说正因为有了扫描电镜,才有了电子探针。1935 年,Knoll 首次提出扫描电镜的基本原理。第一台扫描电镜的试制品出现于 1938 年,但第一台商品化扫描电镜是英国剑桥仪器公司生产的“立体扫描(stereoscan)电子显微镜”,分辨率为 50nm,出现于 1965 年。这一商品一出现,立即受到地质学、冶金、生物等领域研究人员的重视和欢迎。

1973 年以来,扫描电镜普遍与电子探针仪器组合在一起,分辨率也有所提高。此外,扫描电镜除具有较高的图像功能外,还普遍配置 X 射线能谱仪用于成分分析。另外,扫描电镜还可以附有其他配件,以进行特殊用途的分析,如低温扫描电镜和低压扫描电镜。

低温扫描电镜是为适应于超导材料的研究而开发出来的,它在样品台上装置低温液氮,可以观察 -150K 以上的样品。

低压扫描电镜则是为了生物、有机纤维等样品特制的,要求工作电压小于 1kV 以下。普通 SEM 的工作电压在 5kV ~ 10kV 时,有机样品充电现象已很普遍,如降低电压必然会降低分辨率,为此,研究人员提出更换电子枪。普通 SEM 采用热 W 丝电子枪和 LaB₆ 电子枪(都是热电子发射)。为使发射电子枪的亮度增加,现在出现了场致发射电子枪。场发射扫描电子显微镜是当代扫描电镜更新换代的主流。目前,场发射扫描电子显微镜的分辨率已达到 0.6nm(加速电压 30kV)和 2.5nm(加速电压 1kV),促使高分辨扫描电子显微术和低能扫描电子显微术得到了很大发展。场发射扫描电子显微镜的发展主要表现在以下几个方面:

- (1) 进一步提高电子束照明源的工作稳定性,减少其闪烁噪音;

- (2) 进一步提高在低加速电压下对大试样观察和分析的分辨率;
- (3) 开拓同低能扫描电子显微术有关功能的新仪器技术。

四、电子探针分析特点

(一) 微区、微量

电子探针是 X 射线显微分析仪,因此,“微”是电子探针的一大特点。为了对这个“微”字有个定量的概念,Reed(1993)给出 X 射线分布的横向范围 d 的表达式:

$$d = \frac{0.231}{\rho} (E_0^{1.5} - E_C^{1.5})$$

式中, ρ 是密度, E_0 是入射电子束能量, E_C 是元素某特征 X 射线的临界激发能量。因为 X 射线的横向分布是呈指数规律变化的,所以产生 99% X 射线的范围近似地等于 $3d$ 。因此,假如用加速电压为 20kV 的电子束轰击试样铁,可计算得 $d = 0.8\mu\text{m}$,因此空间分辨率为 $2.4\mu\text{m}$ 。只要选择适当的电压,对各种不同类型的样品,通常分辨率仅为 $2\mu\text{m}$ 左右。

一般来说,电子探针分析的检测极限为 100ppm。

(二) 简便、快速

单矿物化学分析要求试样量往往是几十毫克至几百毫克,这样在显微镜下的挑选工作是既费时又困难。对一些稀有分散矿物,则根本难以挑选到足够的数量。另外,有些矿物互相穿插连生或有细小包裹体,很难保证所挑选的矿物是纯净的,这就不可避免的使分析结果产生误差。众所周知,化学分析结果乃是成千上万个矿物颗粒的平均值,无法知道每个颗粒之间的成分差异。而电子探针则可以选取任何感兴趣的颗粒或某一颗粒内的任何一区域进行分析,一般电子探针都配备了光学显微镜,可以一边观察一边分析,因此可以选取理想的、感兴趣的区域进行详细分析。特别是现在电子探针都配备了电子计算机,可以实现数据处理自动化,因此一个点分析现在只需 5min 左右就可完成。

(三) 适用范围宽、准确度高

电子探针现在可分析元素范围为 $^4\text{B} \sim ^{92}\text{U}$ 。对样品含量在 1% 以上的组分,电子探针分析的相对误差在 1% ~ 2% 以内。

(四) 有多种分析方式

应用电子探针,可以进行表面形态分析、定性分析、定量分析、线分析和面分析,从而为全面、系统地研究矿物微区特征提供了可行的手段。电子探针特别为研究矿物包裹体、固溶体出溶和相变提供了极大的方便。

(五) 不损坏样品

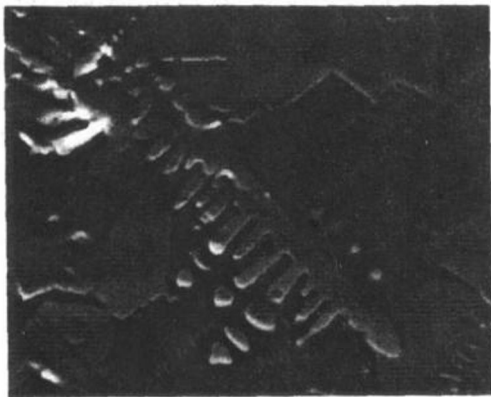
样品分析以后,可以完整地保存或继续进行其他方面的测试,对于分析、鉴定珠宝等特别有利。

五、电子探针的分析功能

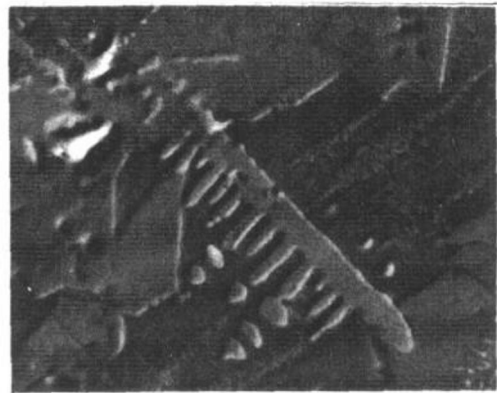
(1) 图像功能:可以利用电子探针进行多种图像观察,如二次电子像、背散射电子成分像、背散射电子形貌像(图 1-3a~d)、电子隧道图像。

(2) 定性分析:确定某一点所含的全部化学元素及相对含量。

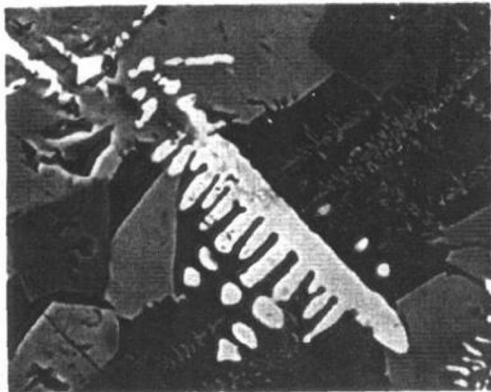
(3) 定量分析:确定某一点精确的化学成分。



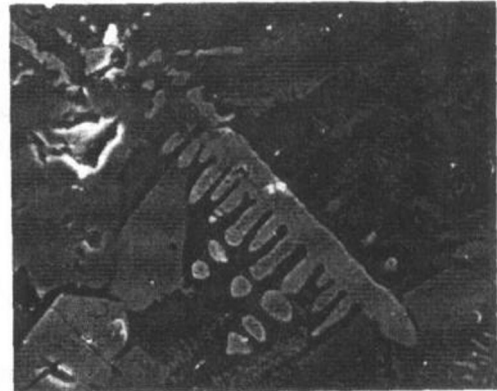
(a) 背散射电子像



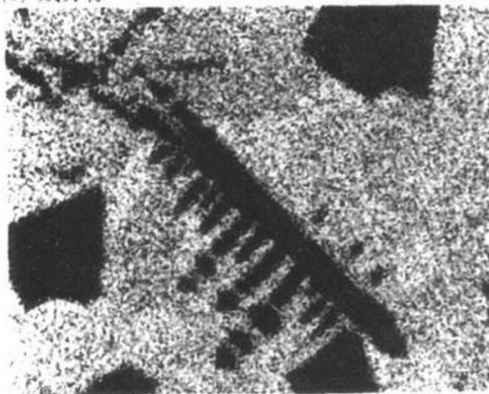
(b) 形貌像



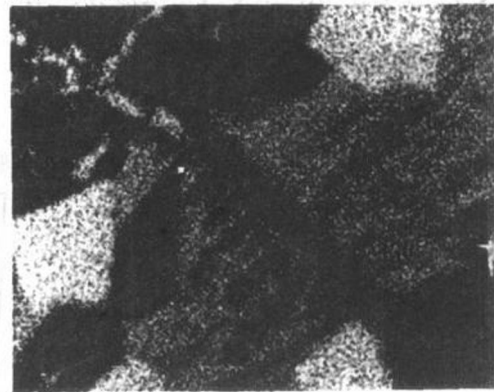
(c) 成分像



(d) 二次电子像



(e) X 射线图像



(f) X 射线图像

图 1-3 非金属坯料的电子探针图像分析

(a) 背散射电子像; (b) 形貌像; (c) 成分像
(d) 二次电子像; (e) X 射线图像(Si); (f) X 射线图像(Al)

(4) 线分析: 某一线段内某元素或某些元素的含量变化。

(5) 面分析: 某一区域内某元素或某些元素的含量变化, 可以反映元素的赋存形态。可分为: ① X 射线元素面扫描图像(图 1-3e~f); ② 数值化元素面分析。

(6) 相分析: 准确反映某一区域内物相的种类及分布情况。

(7) 电子价态分析：可以定性地反映同一元素的不同价态。图 1-4 为表面氧化铜板的电子价态分析,显示有两种价态的铜存在,即： Cu^{2+}O 和 Cu_2^1O 。

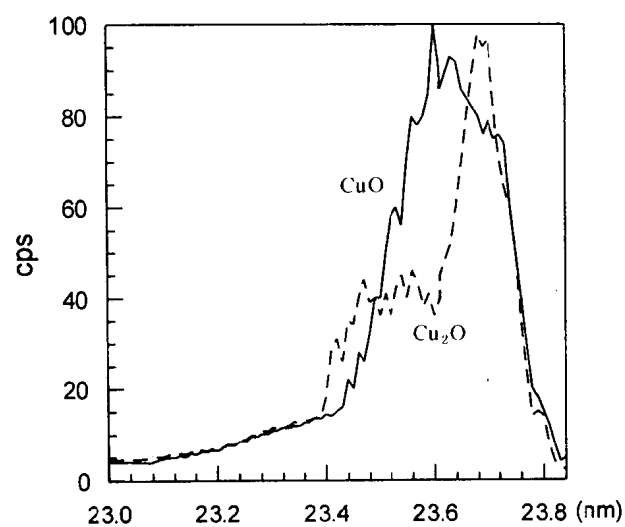


图 1-4 表面氧化铜板的电子价态分析(氧的化学位移分析)

第二节 电子探针分析的物理基础

要深入了解电子探针分析的原理,必需对电子与固体的相互作用、电子束在固体中的行径、X 射线与固体的相互作用(如 X 射线衍射、X 射线的吸收和荧光效应等)的物理过程有基本的了解。

一、电子与固体的相互作用

电子束轰击到试样表面即连续向里穿透,在穿透过程中,由于不断地与路径中的原子相互

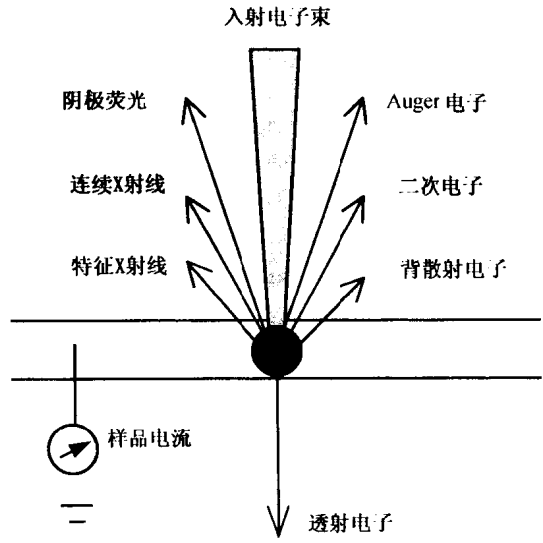


图 1-5 样品在电子束轰击下产生的主要信息

作用而导致入射电子的方向、速度和能量发生变化。入射电子和靶原子之间的这种相互作用可以分为弹性过程和非弹性过程两种。入射电子和原子核的弹性碰撞称为弹性过程,此时,原子核和入射电子之间没有发生能量转换。而非弹性过程则产生于入射电子与原子中轨道电子的相互作用,在此过程中,入射电子和靶原子之间发生了能量转换而产生二次电子、背散射电子、俄歇电子、特征 X 射线、连续 X 射线和阴极荧光等(图 1-5)。

(一) X 射线产生机理

X 射线是用于电子探针分析的最主要信息,将重点加以讨论。在描述 X 射线时,我们可以用 X 射线的能量 $E(\text{keV})$ 或波长 $\lambda(\text{nm})$ 来表示:

$$\lambda = \frac{hc}{eE} = \frac{1.2398}{E}$$

式中, h 为普朗克常数, c 为光速, e 为电子电荷。

1. 连续 X 射线(continuum X-ray)

电子探针分析一般使用 $10\text{kV} \sim 30\text{kV}$ 的工作电压,入射电子具有很高的速度。当入射电子轰击样品时,因为受到原子核库仑场的作用而骤然减速,在减速过程中会产生电子能量损失,于是就辐射出 X 射线,这种辐射作用称为轫致辐射(bremsstrahlung)(图 1-6)。由于在原子核库仑场作用下入射电子的速度变化是连续的,辐射出的 X 射线的能量也是连续的,可以从 0kV 至样品原子的能量,所以称为连续 X 射线。因此,当电子束轰击样品时,因为受到原子核库仑场的作用发生轫致辐射而形成的具有连续能量变化的 X 射线称为连续 X 射线。在电子探针分析时连续 X 射线表现为背景。

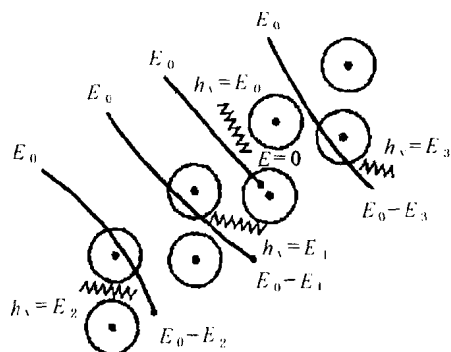


图 1-6 连续 X 射线产生机理示意图

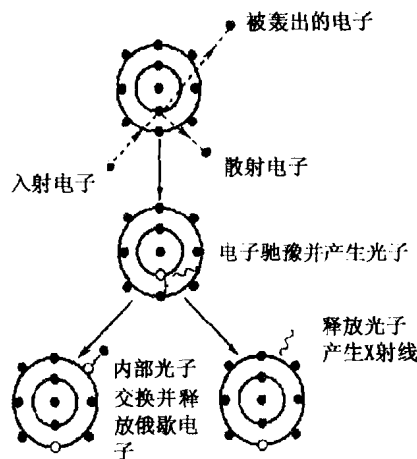


图 1-7 特征 X 射线产生机理示意图

2. 特征 X 射线(characteristic X-ray)

由于样品组成元素原子中的电子层受到加速电子轰击,若入射电子的能量大于元素的临界激发电压,就能够把某一轨道上的电子轰击出来而产生空穴,使原子处于激发状态,此时,高能级的外层电子就会向低能级电子层中的空穴跃迁,多余的能量以 X 射线的形式释放出来(图 1-7)。由于不同元素的原子结构不同,电子跃迁的方式不同,因此,产生同一线系的 X 射线的波长(或能量)有明显的差别。由于电子轰击样品,使样品中被打击的微小区域内所含元素的原子激发而产生的能表征元素的 X 射线,称为元素的特征 X 射线。在电子探针分析时表