第二十四章　矿物分析测试与研究的现代方法

本章概要

1. 矿物样品的采集与分选及矿物形态研究方法
2. 矿物成分分析与研究方法
3. 矿物物相及结构研究方法
4. 矿物物理性质测定与研究方法
5. 矿物年代学研究方法

表 24－1 列出常用的分析测试方法及其主要研究内容，供初学者参用。

表 24－1　常用分析测试方法及其主要研究内容

研究内容 / 测试方法	化学成分	晶体结构	晶体形貌	物理性质	物相鉴定
化学分析	○				
发射光谱分析	○				
原子吸收光谱分析	○				
X 射线荧光光谱分析	○				
等离子质谱分析	○				
电子探针分析	○				
中子活化分析	○				
电子显微镜分析(透射.扫描)	○	○	○		○
X 射线衍射分析(单晶,粉晶)		○			○
红外吸收光谱分析		○			○
穆斯堡尔谱分析	○	○			
扫描隧道显微镜分析		○	○		
反射测角仪测量			○		○
相衬显微镜观测			○		
偏光显微镜观测				○	○
反光显微镜观测				○	○
热发光分析				○	
阴极发光分析			○	○	
热电系数分析				○	
磁化率分析				○	
热　分　析				○	○

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

第一节　矿物样品的采集与分选

1．样品的采集

样品采集时应注意以下几点：

①样品的产状描述：详细记录矿物在地质体中的宏观赋存状态；地质体的矿物组合及各种矿物的空间关系（颗粒大小、相嵌关系、生成顺序及共生组合等）；矿物产出的地质体几何形态、规模大小、结构构造及空间变化；矿物所在地质体与周围其他地质体的接触关系。

②样品的代表性：如果拟采集的矿物所在地质体空间变化较大时，应按照拟研究的内容在不同空间分别采集样品，以保证矿物样品的代表性。

③样品的重量和数量：如果矿物在地质体中的含量较少，应采集足够大的样品，以保证分析测试的需要并适当留有余地；根据研究的需要，有时还需采集足够多的样品，以反映矿物属性在空间的变化规律。

④样品的定向性：在进行成因矿物学和应力矿物学研究时，常常要求对矿物或矿物集合体进行定向取样，即在所采集的样品上标记其野外的实际产出方位，以反映成矿介质的运动方向和矿物所在区域的应力场特征。

⑤样品的编录登记：有条件时应利用数码相机对采集点进行拍照，用 GPS 标定采样点的位置，用笔记本电脑记录样品编号、采样点位、样品产状、样品性质及特征、拟进行的测试项目等内容。无电子条件的应进行纸质素描、定位和记录。

⑥样品的保管：样品类别较多时要注意分类保管；易碎样品和完好的矿物晶体应用绵纸包好后放入木箱中运输。

2．矿物分选

样品分选越纯，测试结果的可信度和精度就越高。

单矿物分选的方法要根据样品中各种矿物的相对密度、磁性、电性、表面性能、形态和化学性质差异来确定。常用的选矿方法有：重选法、浮选法、磁选与电选法，人工挑选等。

重选法是利用不同矿物相对密度的差异来分选矿物的。常用的重选法按工艺进一步分为淘洗分选、摇床分选、离心分选、重液分选等方法。

浮选法是根据矿物表面物理化学性质的差别，经浮选药剂处理，使有用矿物选择性地附着在气泡上，达到分选的目的。

磁选法是基于被分离样品中不同矿物的磁性差异，采用不同磁选机将矿物分离开来的方法。其分离方式有吸住和吸引两种。前者是指磁性较强的矿物被吸住在磁极上或紧靠磁极的聚磁介质上而与弱磁性矿物分离；后者是磁性较强的矿物朝磁极运动，磁性较弱的矿物背离磁极运动而分离。它主要用于分选含磁性（铁、锰、铬）的矿物；也用于有色和稀有金属矿物的分选。

电选法是根据矿物电学性质差异而使之分离的一种物理分选方法。有介电分离和静电分离法。该法主要用于稀有金属、有色金属和非金属矿物的分选。

此外，还有根据矿物表面性能及化学性质差异进行矿物分离等分选方法（见第二十五章），但使用这些方法时应注意不要破坏所选的单矿物。

如果待测矿物颗粒大，含量高，用量少时，可在双目镜下用针逐一挑出；如果粒度小，待测矿物含量少，且用量大时，则可以根据矿物的物理性质，采用不同方法分选。其分选程序一般是：淘洗、摇床分选、磁选、电磁选、重液分选和介电分选等。当然，不同矿物的分选流程是有差异的。经过上述各种方法分选出来的单矿物样品，最后必须经过双目镜下的检查和挑选，以达到精样要求。

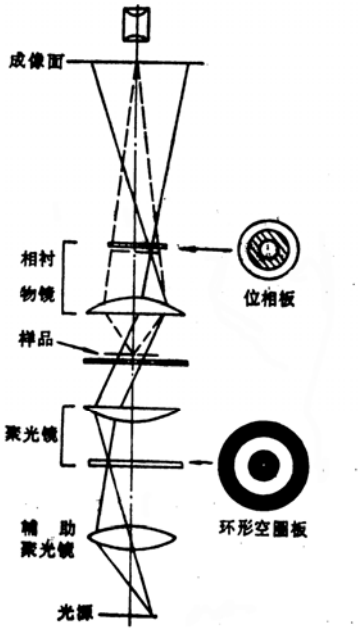
中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

第二节 矿物形态研究方法

矿物形貌研究是籍以探索矿物生长机制和生成历史的重要内容，通常用直接观察的方法来进行。较大颗粒的宏观矿物形态只须肉眼观察或借助实体显微镜即可，更深入的微观形貌观察必须借助高倍显微镜进行。根据工作原理，可将矿物形貌观察显微镜分为光学和电子两大类。

1．光学显微镜

光学显微有实体、偏光和反光等 3 种类型。



实体显微镜能较为直观地放大物体，放大倍数不高，一般几倍至１００倍，可以观察矿物形态、解理以及表面较明显的微形貌结构。

偏光显微镜能放大数十倍到数百倍，可以观察矿物的双晶、解理、块状或隐晶集合体形态等特征。

反光显微镜通常用于不透明矿物的集合体形态的观察。

２．相衬显微镜

相衬显微镜能够观察到矿物表面纳米（nm）尺度的分子层厚度，对推动晶体表面微形貌的研究起了极其重要的促进作用。

相衬显微镜有透射式与反射式两种类型（透射式的光学系统如图 24－1），前者用于观察薄片中矿物内部显微构造，后者用于观察晶体表面。借助相衬显微镜，能清晰看到微米（μm）级、具立体感的微观形貌，对探索矿物的结晶状态和生长机制，提供了许多用常规方法所不能获得的十分丰富的信息。

3．电子显微镜

电子显微镜包括透射电镜（TEM）和扫描电镜(SEM)，是将电子束激发样品微区产生的信号收集、放大并转换成各种图像、图谱或强度数据，从而直接给出亚微观尺度的样品形貌、结构和成分的仪器。

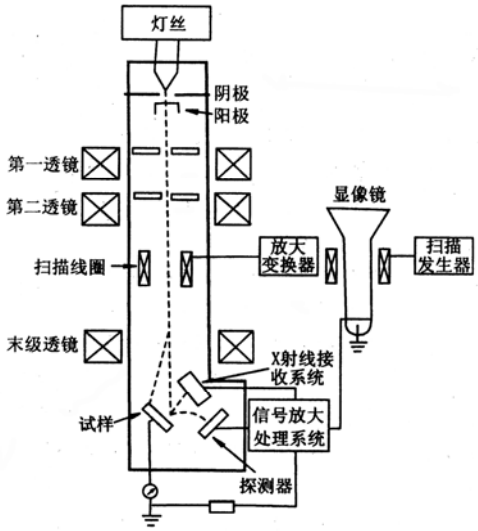


图 24－2 扫描电子显微镜结构示意图

放大倍数由几百倍到 200 万倍，分辨率达 0.7—1nm，可观察晶格像、位错、晶体缺陷等微细结构的变化。透射电镜的实验技术，要求制备极薄（100—200nrn）的透明样品，目前主要通过离子减薄制样技术获得。

目前扫描电镜普遍的分辨率是 4—7nm，放大倍数可从 10 倍到 30 万倍，中间连续可调，图像清晰，立体感强。扫描电镜制样简单，对具导电性样品，不必经过加工，只要其大小不大于样品座即可，对于非导电性样品，需在表面喷镀 5—20nm 厚导电膜，通常是用二次电子发射系数高的金或碳喷镀（习惯称镀金或镀碳）。

除以上矿物形貌研究方法外，还有光学测角仪，主要对晶体的面角进行测量。

4．扫描探针显微镜

探针显微镜((Scanning Probe Microscope，简称 SPM)是指那些以隧道效应为理论基础发展起来的各种分析实验方法。它们都是通过一个探针相对于样品进行扫描，通过监测两者之间电、光、力、磁场等随针尖与样品间隙的变化来获取待测样品表面的有关信息。SPM 家族中最为重要的两种成员是扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope，简称 **STM**)和原子力显微镜(Atomic Force Microscope，简称 **AFM**)。

(1)扫描隧道显微镜

STM 的基本原理是量子的隧道效应。

扫描隧道显微镜的特点是 STM 实验不需接触样品，研究物质表面结构。STM 具有原子级

的分辨率，使它成为目前分辨率最高的表面分析仪器。STM 可以在各种环境中进行实验，可以直接观察原子间转移的过程。

虽然 STM 具有很多独特的优点，但同时它也存在自己的局限性。

(2)原子力显微镜

AFM 的探头是对微弱力（如范德华力）极敏感的微悬臂。当微悬臂的针尖接触样品时，针尖尖端的原子与样品表面的原子会产生极微弱的排斥力。扫描样品时通过控制这种力使之恒定，针尖与样品间作用力的等位面便能从原子尺度上反映矿物表面的微形貌。

AFM 不仅适用于导电样品，也适用于不导电样品。

（3）扫描探针显微镜在矿物学研究中的应用

SPM 应用于与矿物有关的研究始于 1988 年。近 10 年来 SPM 已被广泛应用于各种与矿物或矿物材料学研究有关的领域。

1)、矿物材料表面形貌研究

2)、矿物材料表面原子结构研究

3)、矿物材料表面吸附和化学反应研究

第三节 矿物成分分析与研究方法

矿物化学成分的分析方法有常规化学分析，电子探针分析，原子吸收光谱、激光光谱、X 射线荧光光谱，等离子光谱和极谱分析，中子活化分析及等离子质谱分析等。

在选择成分分析方法时，应注意检测下限和精密度。

检测下限（又称相对灵敏度）指分析方法在某一确定条件下能够可靠地检测出样品中元素的最低含量。显然，检测下限与不同的分析方法或同一分析方法，使用不同的分析程序有关。

精密度（又称再现性或重现性）指某一样品在相同条件下多次观测，各数据彼此接近的程度。通常用两次分析值（C_1 和 C_2）的相对误差来衡量分析数值的精密度。即

相对误差 $RE\% = \dfrac{C_2 - C_1}{(C_1 + C_2)} \times 100\%$

常量元素（含量大于或等于 0.1%）分析中，根据要求达到分析相对误差的大小，对分析数据的精密度作如下划分：

定量分析　　RE%＜±5%

近似定量分析　　RE%＜±（5-20）%

半定量分析　　RE%（20-50）%

定性分析　　RE%＞±100%

定量分析要求主要是对常量组分测定而言的，微量组分测定要达到小于±5%的相对误差则比较困难。

1.化学分析法

化学分析方法是以化学反应定律为基础，对样品的化学组成进行定性的和定量的系统分析。化学分析又称“湿法分析”。它包括重量法、容量法和比色法。前两者是经典的分析方法，检测下限较高，只适用于常量组分的测定，比色法由于应用了分离、富集技术及高灵敏显色剂，可用于部分微量元素的测定。

化学分析特点是精度高，但周期长，样品用量较大，不适宜大量样品快速分析。

2．电子探针分析法

电子探针 X 射线显微分析仪，简称电子探针（EMPA）。样品无论是颗粒，还是薄片、光片，都可以进行非破坏性的分析。

中国地质大学（北京）矿物教研室

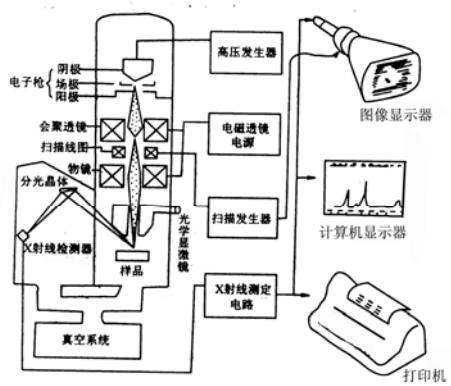


图 24－3 电子探针结构示意图

电子探针可测量元素的范围为 ^{4}Be 一 ^{92}U。灵敏度按统计观点估计达万分之三。测定直径一般最小为 1μm，最大为 500μm。它不仅能定点作定性或定量分析，还可以作线扫描和面扫描来研究元素的含量和存在形式。线扫描是电子束沿直线方向扫描，测定几种元素在该直线方向上相对浓度的变化（称浓度分布曲线）。目前，电子探针已卓有成效地应用于矿物的成分分析、鉴定和研究等各个方面。

值得注意的是，电子探针一个点的分析值只能代表该微区的成分，并不是整个矿物颗粒的成分，更不能用来代表某工作区该矿物的总体成分。因为在矿物中元素的分布是不均一的，不能“以点代面”。此外，电子探针对查明混入元素在矿物中的存在形式的能力是有限的。

电子探针分析法对发现和鉴定新矿物种属起了重要的作用。这是由于电子探针在微区测试方面具有特效，因而对于难以分选的细小矿物进行鉴定和分析提供了有利条件。

电子探针也有它的局限性。例如：它不能直接测定水（H_2O、OH）的含量；对 Fe 只能测定总含量，不能分别测出 Fe^{2+}和 Fe^{3+}等。

电子探针分析的样品必须是导电体。若试样为不导电物质，则需将样品置于真空喷涂装置上涂上一薄层导电物质（碳膜或金膜）。

3.光谱类分析法

光谱类分析法是应用各种光谱仪检测样品中元素含量的方法。此类分析方法很多，目前我国以使用发射光谱分析（ES）、原子吸收光谱分析（AA）、X 射线荧光光谱分析（XRF）和电感耦合等离子发射光谱（ICP）、原子荧光光谱（AF）、极谱（POL）等较为普遍。它们的特点是灵敏、快速、检测下限低、样品用量少。适于检测样品中的微量元素，对含量大于 3%者精度不够高。

光谱分析的流程见图 24－4。

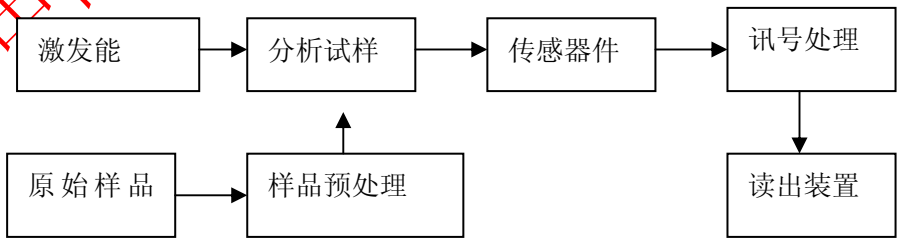


图 24－4 光谱分析流程图

4. X 射线光电子能谱分析法

中国地质大学（北京）岩石矿物实验研究室

X 射线光电子能谱仪可用于测定固、液、气体样品除 H 以外的全部元素，样品用量少（10^{-8}g），灵敏度高达 10^{-18}g，相对精度为 1%，特别适于作痕量元素的分析，而且一次实验可以完成全部或大部分元素的测定，还可选择不同的 X 射线源，求得不同电子轨道上的电子结合能，研究化合物的**化学键和电荷分布**等，还可测定**同一种元素的不同种价态的含量**。

5. 电感耦合等离子质谱分析法

电感耦合等离子体质谱（Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry，简称 ICP-MS）技术是 1980 年代发展起来的、将 ICP 的高温（8000K）电离特性与四极杆质谱计的灵敏快速扫描优点相结合而形成的一种新型的元素和同位素分析技术。

ICP-MS 的分析特性：在 ICP-MS 中，ICP 作为质谱的高温离子源（7000K），样品在通道中进行蒸发、解离、原子化、电离等过程。扫描元素质量数范围从 6 到 260，浓度线性动态范围达 9 个数量级从 ppq 到 1000ppm 直接测定。与传统无机分析技术相比，ICP-MS 技术提供了最低的检出限、最宽的动态线性范围、干扰最少、分析精密度高、分析速度快、可进行多元素同时测定以及可提供精确的同位素信息等分析特性。

在矿物研究方面的应用有：矿物稀土、稀散以及痕量、超痕量元素分析；铂族元素分析；溴、碘等非金属元素的分析；同位素比值分析；激光烧蚀固体微区分析等。

6. 穆斯堡尔谱

穆斯堡尔谱为一种核 γ 射线共振吸收谱。产生这种效应的约有 40 多种元素，70 多种同位素。目前得到广泛应用的是 Fe^{57} 和 Sn^{119}。

由于地壳中铁的分布相当广泛，很多矿物都含铁，因此铁的穆斯堡尔谱已成为矿物学研究中一个重要课题。应用这种方法可以测定晶体结构中铁的氧化态、配位以及在不同位置上的分布等等。图 24－5 为某一透闪石石棉的穆斯堡尔谱，图中显示了 Fe^{2+}离子在两种八面体配位位置 M_1 和 M_2 中的分配情况，AA’双峰表示 M_1 位的 Fe^{2+}，CC’双峰表示 M_2 位的 Fe^{2+}。

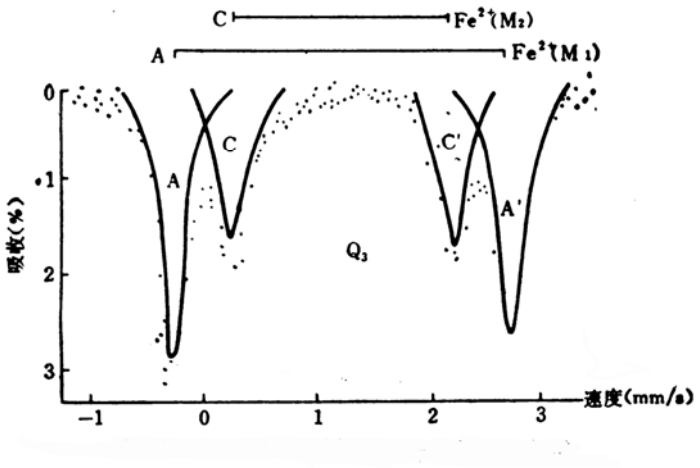


图 24－5 某透闪石石棉的穆斯堡尔图谱

第四节 矿物物相及结构研究方法

在矿物物相分析和晶体结构研究中，最常用的方法是粉晶和单晶 X 射线衍射分析，其

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

次为红外和拉曼光谱分析、热分析及阴极发光分析等。

1．X 射线分析法

X 射线衍射分析是通过仪器得到晶体的面网间距 d 和衍射线的相对强度 I / I_0 两组衍射数据，根据衍射数据进行物象分析。

X 射线衍射分析有粉晶（多晶）衍射分析和单晶衍射分析两种方法。粉晶衍射采用粉末状（1－10μm）多晶为样品（50-100mg），粉晶衍射仪通过转动 2θ 角，用辐射探测器和计数器测定并记录衍射线的方向和强度，获得衍射图谱（图 24-7）。衍射图中每个衍射峰代表一组面网。每组面网的面网间距 d 直接打印在峰上，它的衍射强度与峰高成正比，用相对强度表示，即以最强峰的强度作为 100，将其它各衍射峰与之对比确定相对强度 I / I_0。获得衍射数据后，与鉴定表（ICDD 卡片或其它矿物 X 射线鉴定表）中标准数据对比，即可作出矿物鉴定，也可采用计算机数据库检索分析软件进行辅助鉴定。

粉晶衍射物相分析快速简便，分辨率高，记录图谱时间短，精度高，用计算机控制操作和进行数据处理，可直接获得衍射数据，对矿物定性、定量都十分有效，目前已得到了广泛的应用。

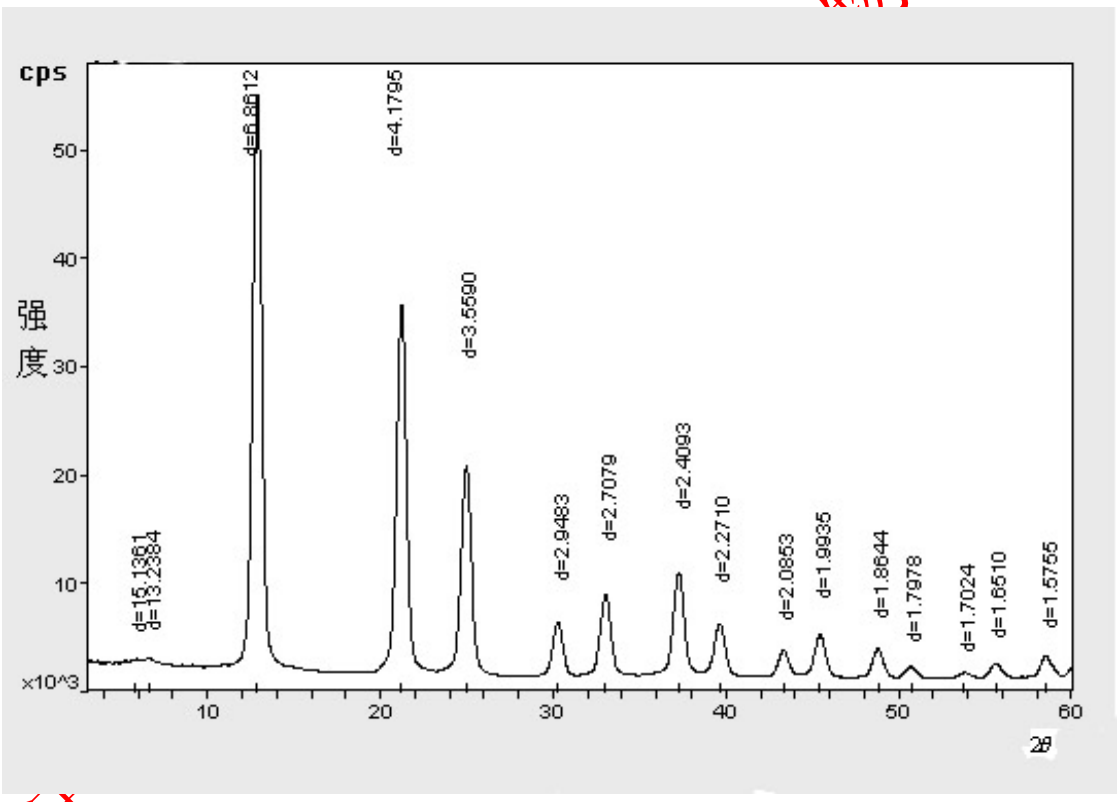


图 24－7　单晶硅粉衍射图，Mo$K\alpha$）

单晶衍射分析一般采用小于 0.2-0.5 ㎜的单个晶体（或单晶碎片）为测试样品。目前较多用四圆测角系统的单晶衍射仪。它是通过一束单色 X 射线射入单晶样品，用计算机控制 4 个圆协同作用，调节晶体的取向，使某一面网达到能产生衍射的位置，用计数器或平面探测器记录衍射方向和强度。据此，可测定晶胞参数，确定空间群，求解原子坐标，计算键长、键角，最终得到晶体结构数据。

2.红外光谱和拉曼光谱分析法

将一束不同波长的红外光照射到矿物上，某些特定波长的红外射线被吸收，就形成了这个矿物的红外吸收光谱。每种矿物都有由其组成和结构决定的独有的红外吸收光谱，可以采用与标准化合物的红外光谱对比的方法来做分析鉴定。

红外光谱仪有 2 类。一类是单通道测量的棱镜和光栅光谱仪，属色散型，它的单色器为棱镜或光栅。另一类为傅里叶变换红外光谱仪，它是非色散型的，有许多优点：可实现多通道测量，提高信噪比；光通量大，提高了仪器的灵敏度；波数值的精确度可达 0.01 厘米$^{-1}$；增加动镜移动距离，可使分辨本领提高；工作波段可从可见区延伸到毫米区，可以实现远红外光谱的测定。

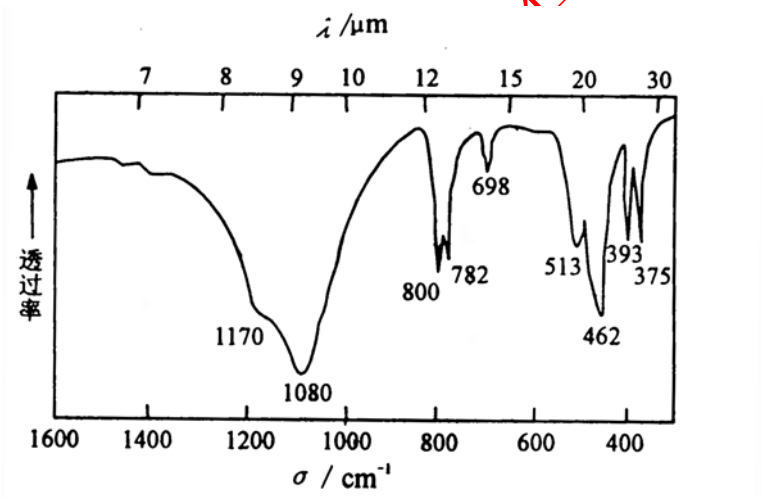
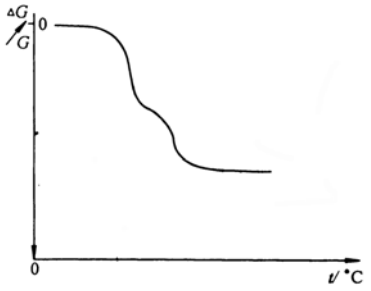


图 24－8　石英的红外光谱图

现代激光拉曼光谱仪除其主要部件激发源（氩离子激光）、样品室、信号检测系统和数据处理系统外，还常加装显微镜，构成显微拉曼探针仪。其空间分辨率为 1 μ ㎡，检测限为 10^{-9}－10^{-12}g，是微粒、微区、微结构中的分子类别及含量鉴定的有力工具。

3.热分析法

热分析法是根据矿物在不同温度下所发生的热效应来研究矿物的物理和化学性质，目的在于求得矿物的受热（或冷却）曲线，以确定该矿物在温度变化时所产生的吸热或放热效应。此法常用于鉴定肉眼或其它方法难以鉴定的隐晶质或细分散的矿物；特别适于鉴定和研究含水、氢氧根和二氧化碳的化合物，如粘土矿物、铝土矿、某些碳酸盐矿物、含水硼酸盐及硫酸盐矿物、非晶质的铌、钽矿物等；还可以测定矿物



中水的类型。

热分析法包括热失重分析和差热分析。

在程序控温下测量物质和温度变化关系的方法称热重分析法，在加热过程中测量得到物质质量和温度的关系曲线称热重曲线（图 24-9）。不同含水矿物具有不同的脱水曲线。利用这种方法，可以鉴定和研究含水矿物，如粘土矿物等。

图 24－9 热失重曲线图

差热分析法是将矿物粉末与中性体（不产生热效应的物质，常用煅烧过的 Al_2O_3）分别同置于一高温炉中，在加热过程中，矿物发生吸热（因相变、脱水或分解作用等原因引起）或放热（因结晶作用、氧化作用等引起）效应，而中性体则不发生此效应，将两者的热差通过热电偶，借差热电流自动记录出差热曲线，线上明显的峰谷，分别代表矿物在加热过程中的吸热和放热效应。本方法对粘土矿物、氢氧化物、碳酸盐和其它含水矿物的研究最有效。

目前，矿物的差热分析法有了很大的进展，不仅用来定性地鉴定矿物，有时还可以做定量分析、探讨矿物在加热时结构的变化和研究矿物的类质同像混入物等。如：

（1）含水矿物的脱水，普通吸附水脱水温度：100－110℃ 。层间结合水或胶体水：400℃内，大多数 200 或 300 ℃内。架状结构水：400 ℃左右。结晶水：500 ℃内，分阶段脱水。结构水：450 ℃以上。

（2）矿物分解放出气体，CO2、SO2 等气体的放出，曲线有吸热峰

差热分析有一定的局限性，只适用于受热后有明显的物理、化学变化的物质，并有许多干扰因素而影响效果。因此，它必须和其它测试方法结合起来，如和 X 射线分析、电子显微镜、化学分析等密切配合使用。

3.阴极发光分析法

阴极发光是物质表面在高能电子束轰击下发光的现象。不同矿物或相同种类不同成因的矿物，在电子束的轰击下，会发出不同颜色或不同强度的光，同时能显示晶体生长环境有关的晶体结构或生长纹，可辅助矿物鉴定。

第五节 矿物物理性质测定与研究方法

矿物物理性质涉及的内容很多，它们都有相应的仪器精确测定，如热电仪、热发光仪、热导仪、磁化率仪、反射率仪等。以下仅简要介绍矿物的显微硬度、相对密度和折射率等几种最基本物理性质的测定方法。

1. 显微硬度

显微硬度测试方法很多，使用最广泛的是压入法。压入法就是把一个很硬的压头以一定的压力压入试样的表面，使金属产生压痕，然后根据压痕的大小来确定硬度值。压痕越大，则材料越软；反之，则材料越硬。根据压头类型和几何尺寸等条件的不同，常用的压入法可分为布氏法、洛氏法和维氏法三种。

2.密度

密度是指单位体积物质的质量，单位是 g/cm^3 。而相对密度是物质的密度与参考物质的密度在对两种物质所规定的条件下的比，系纲量为一的量。密度的测量可以用称量法、流体静力称衡法和比重瓶法测量。

3.折射率

一般折光率系指光线在空气中进行的速度与在供试品中进行速度的比值。根据折射定律，折光率是光线入射角的正弦与折射角的正弦的比值，即

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

n＝Sin i/Sin r

式中，n 为折光率；Sin i 为光线的入射角的正弦；Sin r 为折射角的正弦。

物质的折光率因温度或光线波长的不同而改变,透光物质的温度升高，折光率变小；光线的波长越短，折光率就越大。折光率以 nD 表示，D 为钠光谱的 D 线，t 为测定时的温度。

第六节 矿物年龄测定方法

放射性同位素都具有固定的蜕变速度。某一放射性同位素蜕变到它原来数量的一半所需的时间称为半衰期，如 U^{238} 半衰期为 4.49×10^{9} 年,利用放射性同位素具有固定的蜕变速度这一特点，能够测定含有该放射性元素的矿物形成年龄，同位素年龄测定方法就是基于这一原理。

矿物年龄测定是指利用放射性同位素衰变定律，测定矿物在某次地质事件中，从岩浆熔体、流体中结晶或重结晶后，到现在所经历的时间。当矿物结晶时，各种放射性同位素以不同浓度进入其中后，它们在矿物中的含量随着时间作指数衰减，与此同时，放射成因子体不断积累。在矿物自形成以来一直保持同位素体系封闭的条件下，即体系中没有发生母、子体与外界物质的交换，没有带进和带出，那么通过测定现在矿物中母体及对应子体的含量，根据衰变定律就能得到矿物的同位素地质年龄，这一过程就叫做矿物年龄测定。如矿物、岩石、化石等的年龄进行测定。

常用的同位素测年方法如下：

（1）铀（U）－铅(Pb) 法

^{238} U 和 ^{235}U 都自然地衰变并释放出 α 粒子。^{238} U 的半衰期是 45 亿年，即 1 克 ^{238}U 在 45 亿年后将剩下 0.5 克，90 亿年之后只剩 0.25 克，依此类推。^{238} U 衰变成 ^{234}U，然后依次相当快地经过一系列子体产物衰变成同位素 ^{206}Pb。同样， ^{235} U 衰变成 ^{207}Pb， ^{232} Th 衰变成 ^{208}Pb 如此放射衰变的结果，含铀矿物不断地积累着铅。这三个衰变系列可分别用下列简化式来表示：

^{238} U→^{206} Pb +8 α +6 β -

^{235} U→^{206} Pb +7 α +4 β -

^{232} Th→^{208} Pb +6 α +4 β -

用同位素稀释铀－铅测定法确定岩石年龄的程序如下：

1）从要测定的岩石里分离出含铀矿物，如锆石。2）。在超静化实验室里仔细的将锆石样品溶解并富集出铀和铅元素，加入适量稀释剂。

3）用质谱仪测出样品铀、铅同位素比值，跟据公式计算出相应铀、铅同位素含量的相对比值。

4）岩石的近似年龄可通过上面公式算出，即从 ^{238}U－^{206} Pb、^{235} U－^{207} Pb、^{232} Th－^{208} Pb，或是由 ^{206}Pb 与 ^{207}Pb 的比值计算出来。

（2）钾（K）－氩（Ar）法

自然钾有三个同位素，即 ^{39}K、^{40} K 和 ^{41}K，稳定同位素 ^{41} K 的丰度远比放射性同位素 ^{40}K 要高。通过质子对电子的捕获， ^{40} K 衰变成惰性气体 ^{40}Ar。^{40} K 的半衰期是 13 亿年,因此很老的岩石年代可以用钾氩法测定。黑云母、白云母、角闪石、透长石、海绿石和兰闪石等含钾矿物，以及全岩都可用 K－Ar 法测定。

含钾矿物在多数岩石里较丰富，因此这一方法被广泛应用。矿物或岩石内钾的含量可由化学分析得知，氩的含量由质谱仪测定而得。

由于氩是气体，它可以在变质期间从矿物和岩石中丢失，所以一般认为钾－氩法得出的

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

数据，代表着岩石的最低限年龄，如花岗质岩石最后一次热事件的年龄，变质岩最后一次变质的年龄，或者一个地区最后一次重要上升和剥蚀的年龄。然而如果变质作用期间它不完全丢失，^{40}Ar 可以从沉积岩里原先的矿物继承下来，变质岩测出的年龄就比真正变质作用的时代要老。尤其是在测定浅变质岩（如板岩）时，会有这种问题。此外，有些矿物可以吸附外来的氩，对这种矿物用钾氩法测得的年龄数据一般也会偏大。

（3）氩（Ar）－氩（Ar）法

将样品放入核反应堆中接受快中子照射，^{39}K 核被打进一个中子，而后放出一个质子，形成 ^{39}Ar，用质谱计测定被照射样品的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 比值，代替常规钾-氩法中 $^{40}Ar/K^{40}$ 比值，从而计算出样品年龄的方法，实验中用一已知年龄(ts)的标准与待测样品一块进行辐照，由下式求得 J 值：$J=(e^{\lambda t}-1)/(^{40}Ar/^{39}Ar)$。此方法解决了过去钾、氩分别由不同方法测定所产生的不同误差使年龄精度较低的弊端；同时由于照射后样品氩的释放可采用阶段加温方法，对一个样品便可获得一系列的表面年龄，最终得到代表矿物或岩石结晶的稳定平均年龄；或由等时线法处理得到样品的年龄。

（4）铷（Rb）－锶（Sr）法

多数造岩矿物里含有少量的铷，放射性同位素 ^{87}Rb 衰变放射出一个电子成为 ^{87}Sr。衰变公式为：$^{87}Rb \rightarrow ^{87}Sr + \beta^{-} + \upsilon + Q$。$^{87}Sr$ 的半衰期为 500 亿年，可用它测定古生代和前寒武纪的地质事件。假定岩石结晶时所有矿物含 ^{87}Sr 和 ^{86}Sr 的比值相同，存在于岩石内 ^{87}Sr 的累积数量和 ^{87}Rb 的初始数量是成正比关系，所以随着时间变化岩石内 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 的比值将增加，而 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 的比值则减小。在 Rb-Sr 等时线图上 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 的比值与 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 的比值是相对应的，由于 ^{87}Rb 的半衰期已经知道，样品的年龄可从等时线的斜率计算出来，它在图上是一条连接各点的直线，全岩 Rb-Sr 年龄是通过用 Rb-Sr 等时线图来测定。

由于黑云母和白云母在变质时可能丢失 Sr，因此这些矿物的 Rb-Sr 测定所提供的年龄值是岩石最后受热的年龄。另一方面，在中等热度情况下，Sr 往往不从岩石里移出，所以一个 Rb-Sr 年代一般可提供火成岩最初结晶的年龄，或者变质岩第一次强烈变质的年龄。然而，如果岩石曾受过交代蚀变作用或者曾受过两次强烈变质作用，全岩 Rb-Sr 测定所表示的年龄值可能是最后的而不是最初的地质事件。

同位素测定法为获得地球不同时期绝对年龄值和各个地质时代的准确时限提供了便利，但是应该注意这些方法也不是没有缺点的，在进行同位素年龄测定时，所选取的样品很难消除后期热变质作用的影响，如果样品是遭受过风化的岩石，与母岩的性质更是相差甚远，所得到的绝对年龄值往往不能代表岩层的真正年龄。因此，要想通过同位素测定法得到一个地区准确的地质年代，精确的取样、先进的设备和缜密的测定过程缺一不可。

近年来，新的一种称之为裂变径迹法的测龄方法得到了广泛的应用，在含铀矿物晶体或玻璃质内的 ^{238}U 和 ^{235}U 自发地裂变产生很细的裂变径迹，呈线形带状，长约 0.0075mm，宽约 0.000001mm。它是由于结晶格架中的缺损或玻璃内化学键的破坏造成裂变碎片高速运动而引起的。每单位面积的径迹数目是铀的丰度和该物质年龄的函数。只要铀的含量被测出来，则其年龄便可由计算一定面积内含的径迹数目而测得。因裂变径迹的直径非常小，它们需要在酸溶液里浸蚀放大，这个方法最有效的方面是可测定年轻地质体的年龄不利的一面是晚期热事件可导致径迹的破坏，因此这个方法只能给出最小年龄值。

中国地质大学（北京）岩矿测试研究室

思考题及习题

1. 成分分析方法都有哪些？各有何优缺点。
2. 扫描探针显微镜和扫描电子显微镜在原理上有何不同？
3. 粉晶 x 射线衍射方法的主要用途有哪些？
4. 矿物中的水可以用什么方法进行分析？
5. 用于分析矿物形成年代的方法有哪些？在选取年龄测试的样品上应注意哪些？

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室