

分析化学手册

〔美〕 J.A.迪安 主编



科学出版社

www.sciencep.com

第 21 章 地质和无机材料

21.1 材料的鉴定和表征	21.2
21.1.1 红外光谱	21.2
表 21.1 矿物中分子实体的振动频率/ cm^{-1}	21.2
表 21.2 四面体和八面体配位的金属氧化物吸收频率/ cm^{-1}	21.3
21.1.2 热分析	21.4
21.1.3 X 射线衍射	21.4
21.1.4 利用电子和 X 射线进行的微区分析	21.5
21.2 矿物分析方法	21.6
表 21.3 矿物表	21.7
表 21.4 矿物分析步骤表	21.14
参考文献	21.29

21.1 材料的鉴定和表征

21.1.1 红外光谱

红外光谱提供了一种快速、简单、方便的非破坏性的表征和鉴定矿物的方法。此方法能很容易地指明晶体结构中特异性原子集团的存在,可能是判定水的存在并鉴定其存在形式的最好方法。同时,它也是检测碳酸盐的有效手段,并为硅酸盐阴离子在矿物结构中的存在本性提供有用的线索。红外研究可以检测非晶相,通过红外光谱鉴定某些矿物比用X射线衍射图谱鉴定要容易得多。

21.1.1.1 矿物的鉴定

作为工具在鉴定矿物种类方面,红外光谱是对X射线衍射的巨大补充。这种方法具有X射线衍射的优点,即能够检测和表征非晶相化合物,这是基于非晶相化合物和晶体物质的吸收同样强烈的特点;同时,红外图谱能更直接地指出未知物质的共性,而这些信息是通过特征谱带的存在与否获得的,如表21.1和表21.2中所示。由于吸收谱带在图谱中的位置对质量、电荷及组分离子的键合形式很敏感,故红外谱图经常能够在物质组成的范围内指认出矿物种类来。在混合物中,有些组分容易用X射线辨认,而另一些组分则更易通过红外光谱展示出来。

表 21.1 矿物中分子实体的振动频率/ cm^{-1}

基 团	伸缩振动	弯曲振动
XOH	3750~2000	1300~400
H ₂ O	3660~2800	1650~1590
NH ₄ ⁺	3330~2800	1500~1390
CO ₃ ²⁻ ; HCO ₃ ⁻	1650~1300	890~700
(BO ₃) _n	1460~1200	800~600
(BO ₄) _n	1100~850	800~600
(SiO ₄) _n	1250~900	<500
(SiO ₆) _n	950~600	
SO ₄ ²⁻	1200~1100	700~600
(PO ₄) _n	1200~900	600~500
VO ₄ ³⁻	915~730	<500
CrO ₄ ²⁻	870~700	<500
WO ₄ ²⁻ ; MoO ₄ ²⁻	850~740	<500
(MoO ₆) _n	1000~750	<500
(WO ₆) _n	900~700	<500
AsO ₄ ³⁻	850~730	

表 21.2 四面体和八面体配位的金属氧化物吸收频率/ cm^{-1}

金属离子	XO_4		XO_6	
	离析的	耦合的	离析的	耦合的
Al	650~800	700~900	400~450	500~650
Be		700~950		
Fe^{2+}				约 400
Fe^{3+}	550~650	550~750	300~450	400~550
Li	400~500	400~600		< 300
Mg	500~550			350~480
Ti^{4+}	650~800			600~650
Zn	400~500	400~650		约 400

当然,以红外光谱对矿物进行经验鉴定,需要去比照已收集的标准品制备的红外图谱.为了鉴定的需要,仅仅列出最高吸收峰的频率是不够的,因为谱带轮廓和相对强度常常是重要的区别特征. Sadtler 图谱集包括 1500 种无机物,数据范围下限至 200cm^{-1} ;而 Nyquist 和 Kagel^[1]给出了 900 个图谱,频率范围从 $3800\sim 45\text{cm}^{-1}$.

红外谱图中最具特色之处,是由结晶水和结构化的羟基基团引起的红外谱带.晶体中水的伸缩振动频率覆盖了结构化羟基的伸缩振动频率,但水分子在近 1630cm^{-1} 处的弯曲振动频率是非常典型的特征,这使得矿物中的水分子可以轻易地从结构化羟基中识别出来. 3532cm^{-1} 处的尖锐谱带是由自由羟基的弱氢键作用引起的,而 2847 和 2450cm^{-1} 处的二宽峰是典型的羧羟基的氢键作用引起的.

21.1.1.2 固相反应的表征

红外谱图尤其适合研究有羟基基团参与的反应,并能给出任何其他方法难以获得的信息.当然,此技术并不仅限于研究羟基的反应.

红外研究也可以与差热分析和热重分析法偶联,这是考虑到重量损失与水分子、结构化羟基或是碳酸盐分解的二氧化碳有关.红外光谱可以作为 X 射线衍射的补充,共同用于跟踪玻璃结晶化和随后发生的系列过程.

21.1.1.3 技术和仪器设备

为了能充分表征无机物,检测 $4000\sim 200\text{cm}^{-1}$ 的频率范围是必需的.在实际应用中,矿物必须以粉末的形式进行检测.但是,大多数矿物的折射率过高(同有机物相比),这就要求矿物必须粉碎得更细(同有机物相比)以避免过度的光散射.过大的粒子会导致平缓起伏的谱图上出现宽宽的、扭曲的吸收谱带.

矿物的硬度使得获取足够细的粒径变得很困难.而将样品粉碎至粒径小于入射波长是必须的,一般要求粒径小于 $2\mu\text{m}$.粉碎应在惰性液体如无水乙醇中进行,以避免在粉碎过程中局部温度过高(可能会达到 500°C)导致某些组分的丢失,最好使用玛瑙和富铝红柱石(莫来石)研磨机.值得注意的是,有些物质尤其是石英、碳酸盐等等,吸收强烈,即使是少至 $1\%\sim 2\%$,也会造成解读图谱的困难.

用于红外扫描的样品,可以与大大过量的碱金属卤化物一起压成透明圆片,或者与合适的有机油一起混成研糊,并置于碱金属卤化物圆片之间.在这两种情况下,周围的物质减少了由于红外光和粉末的折射率匹配而引起的散射.在圆片方法中, KBr 最为常用,直

至 250cm^{-1} , 它均为透明的, 而 CsI 可以用至 150cm^{-1} .

典型的做法是: 约 1mg 样品, 预先在玛瑙研钵中手工研碎, 并用无水乙醇混匀, 然后加入 350mg KBr , 在 Wig-L-Bug 型振荡磨碎机混合, 并配有一不锈钢或玛瑙小管和同类材质的小圆珠. 通常, 混合 10min 就足够将样品粉碎至粒径小于 $2\mu\text{m}$. 然后, 转移混合物至一真空模板中, 用约 $130\,000\text{psi}^{1)}$ ($8840\text{atm}^{2)}$ 的压力将混合物压成型.

若利用上述圆片技术出现问题, 则可用石蜡油调成的研糊或聚乙烯粉末圆片制备的谱图校准其谱图. 商品名为 Nujol 的液体石蜡常用于调制研糊, 而液态氟代烃(碳氟化合物)则用于检测被 Nujol 掩蔽的区域.

21.1.2 热分析

热分析广泛应用于矿物学研究, 尤其是黏土矿物学. 重量变化仅发生于一定的反应, 如涉及分解和氧化的反应中; 而能量转移存在于所有的反应中, 因为排走挥发物, 建立同质多象转变态(多形转变态), 和引发固相反应均需要很多能量. 热分析的结果总是和 X 射线衍射及红外信息联合使用.

21.1.2.1 差示扫描量热法(DSC)和差热分析(DTA)

一涉及到混合物就会出现各种困难, 如峰的重叠, 但更严重的问题是, 组分间发生的固相反应, 会给出全新的峰形, 此峰不属于任何一种单一组分. 对有些矿物来说, 另一个困难是, 饱和阴离子的性质会改变 DTA 曲线的形状.

尽管有上述困难, 我们还是可以按照黏土和其他矿物的 DTA 曲线总的形状, 将其归入正确的类别. 一旦确认了各个矿物的峰的归属, DTA 数据在定量、半定量或是估计组分的相对丰度方面具有重要意义. 同热重分析(TGA)相比, DTA 更具优势, 它既能测定分解或氧化反应, 又能测定相变和固相反应.

21.1.2.2 热重分析(TGA)

热重分析(TGA)曲线给出定量信息, 而微分热重分析(DTGA)曲线可以揭示斜率(反应速率)的微小变化, 这一点可能在 TGA 曲线上丢失. DTGA 曲线除了给出最大反应速率时的温度外, 还可以准确给出程序起始和终止温度. 比较 DTA 和 DTGA 的曲线, 就可迅速判断哪些反应与重量变化有关, 哪些反应与重量变化无关.

21.1.2.3 脱气分析[放出气体(热)分析, 挥发气体分析, 逸出气体分析, EGA]

脱气分析在矿物分析中极其有用, 因为它能迅速指明任何一特殊的 DTA 或 DTGA 峰是否与水、 CO_2 或其他种类分子的逸出有关.

21.1.3 X 射线衍射

X 射线衍射提供了一种简单、便利、快捷的手段, 用以鉴别室温和正常压力下的晶相, 而且能在高压、高温或低温下表征材料, 并能辅助研究固相反应. 用于粉末 X 射线衍射的样品一般只需 $1\sim 2\text{mg}$ 即够, 而用于衍射计的样品(粉碎至粒径小于 $53\mu\text{m}$)则需 100mg ,

1) $1\text{psi} = 1\text{in}^{-2} = 0.155\text{cm}^{-2}$, 下同;

2) $1\text{atm} = 1.01325 \times 10^5\text{Pa}$, 下同.

这些样品仍需磨细,直至含有可观数量的足够精细的样品为止,此样品在估计谱线的位置时会引起谱线展宽,可将粉末样制成半径约为 0.1~0.5mm 的圆柱形。

最常用的粉末照相机由 Straumanis-Ievins 配置,这种相机制成两种尺寸,小的直径为 57.3mm,大的直径为 114.6mm. 小尺寸的相机常用于需快速知道结果,对分辨率要求不高的情况,尤其是常规分析当中;而大尺寸相机更适合于要求结果准确,并且重要衍射谱线有很好分离度的情形. 两种因素影响对 X 射线的选择:利用长波辐射会限制观察到的反射光线的数量,相对地,若晶胞很大,则短波辐射会将各个反射线压缩得很近;对 X 射线的选择也受样品吸收性质的影响. 激发波长刚好小于样品所含元素吸收波长限的情况应避免,因为此时元素会强烈吸收激发光,并将吸收的能量以荧光辐射的方式向各个方向发射,增大了背景干扰. 矿物研究中,晶体角度(2 倍入射角, 2θ)扫描的范围通常为 $70^\circ \sim 75^\circ$.

强吸收样品的测定样可这样制备:用树脂(如阿拉伯树脂)按 4 份样品 1 份树脂的比例稀释样品,润湿上述混合物,并将此黏稠的膏状物用手揉成球状,然后在两个玻璃片之间将其制成直径约为 0.3mm 的圆柱体. 或者,可以将样品和鱼胶或火棉胶的混合物用皮下注射器挤压成膏状物,以真空油脂或虫胶(片紫胶)作为黏合剂,膏状物足以将测定样涂敷到细玻璃纤维上以满足多种测定目的. 硼硅酸玻璃管对易受添加剂影响的物质特别有用,对在空气中不能稳定存在的物质来说则是不可或缺的. 在任何情况下,粉末样品圆柱必须小于入射 X 射线的直径.

X 射线衍射最大的优点是能快速、相对简单地确定物质晶相,缺点是不能测定玻璃相,研究复杂的图谱时有困难,它一般不能给出样品元素分析的任何直接的信息. 我们应输入化学分析数据,从而对系统进行化学计算,并输入光谱数据,以获知是否有玻璃相的存在及混合物中可能存在的不同的晶相的数目.

21.1.4 利用电子和 X 射线进行的微区分析

扫描电子微探针为相关矿物提供的信息主要有四种:(1)研究表面地形学;(2)探索所选择区域的微观结构;(3)用于定量研究,但灵敏度低于电子探针微区分析仪(EPMA);(4)在固定位置通过改变入射光线的角度,或许可以获取单晶测定样的晶体形态特征.

21.1.4.1 电子探针微区分析仪(EPMA)

EPMA 设计的目的,是为了进行定量的化学分析,其次考虑成像. 原 X 射线束射进样品约 $1\mu\text{m}$ 深,故能分析的最小体积大约是 $1\mu\text{m}^3$. 由电子束产生的特征 X 射线——原 X 射线束,相互叠加在背景上,测定前必须进行选择. X 射线强度不严格正比于浓度,必须用校正因子对测定数据进行校正,而校正因子的大小与待测元素的原子数目、基体吸收、荧光发射相关联. 除了轻元素($Z \leq 10$)外,EPMA 测定的相对灵敏度的范围为 10~100ppm,测定的绝对灵敏度约为 10^{-14}g ,对于矿物测定样,总体精度可望达到 3%~5%.

EPMA 的价值在于,能进行非常精密标度的分析,这就是说,若微区结构由很小的粒子或晶粒构成,则 EPMA 常是惟一可用的手段.

21.1.4.2 电子显微镜微区分析仪(EMMA)

EMMA 可以测定很小的粒子(尺寸小于 $1\mu\text{m}$),也能测定较大的粒子,这些微粒会使 EPMA 的反向电子扫描与 X 射线扫描的对照不甚明显. 电子显微镜工作者将对使用

EMMA 产生兴趣,他们现在能方便地获取物质的组成信息表,这些信息除了给出主要微区结构的信息外,最差也是半定量的。

21.1.4.3 离子探针微区分析仪(IPMA)

离子探针微区分析仪利用离子束激发,取代了 EPMA 和 EMMA 中使用的电子束,但这些光束提供的信息是类似的。一次离子束在测定样的作用下产生二次离子发射,或离子溅射,这些二次离子利用质谱进行分析。待测样品的表面可承受连续的侵蚀,其速度可以控制在每秒几埃到几百埃之间。样品被测区域可在 $1\sim 250\mu\text{m}$ 内变化,图像分辨率在 $1\sim 5\mu\text{m}$ 之间,深度分辨率约 10nm 。离子探针的优势在于,能够分析低原子序数的元素(包括氢元素),有好的深度分辨率,能够作出深度轮廓图,并能测定同位素之比;其缺点是区域分辨率较差,直接作出的图像质量较差。

21.1.4.4 俄歇电子能谱(AES)

如果描绘出 $dN(E)-E$ 图(E 为能量, N 为不同能量的电子数目),则可容易地检测出俄歇电子峰。虽然利用氦激发进行的表面离子溅射,可以获得大量的浓度图谱,但由于俄歇电子的逃逸深度约为 $1\sim 4$ 个电子层,故 AES 亦可作为一种表面分析的手段,其相对灵敏度从钠和铝单层的 5% ,到碳或硫单层的 0.3% 均可达到。某些情况下,电子能量分辨率很好,足以区分同一种元素的各种氧化态。AES 可用于检测表面分离物,研究表面反应,分析由原位断裂或分裂所产生的内表面。

21.1.4.5 化学分析电子能谱

这项技术可用于分析,尤其是可用于区分不同的键合或氧化态,其产生的光电子深至 20 个电子层,约为测定样的表面下 5nm 。这样便可在深度介于 AES 和离子微探针的水平上,提供类似的信息,其面积分辨率与 AES 相近。

21.2 矿物分析方法

表 21.3 和表 21.4 列出了近 270 种矿物的最重要和最常测定组分的测试方法。表 21.3 列出了矿物的一般名称和分子式,极少数不常见的名称可见于相关文献。由于种种原因,分子式常大致符合实际分析结果。表 21.3 也为每种矿物提供一种代码,以便在表 21.4 中辨认,而且表 21.3 列出了每种矿物的各种组分,每种组分的测定方法列于表 21.4 中。由于特殊的目的,可能对其他一些组分进行分析,但此处给出的是实际应用中最常见的组分。

任何一种特定元素的测定步骤的选择,很大程度上取决于该元素存在的环境。不同的矿物必须以不同的方式分解,采用不同的分离手段。因此,测定铝的方法在表 21.4 中就列有 13 种左右。最适合测定方沸石中铝的步骤,可通过在表 21.4 第 2 列中找到方沸石的代码(8)而确定,表的其余各列则提供诸如矿物分解、特性、必需的分离细节,以及最终找寻元素的分离及测定等信息。

所谓经典的分析方法包括:重量测定法、比色法或光谱法、滴定法、电弧或电火花发射法,需补充的新的方法包括:ICP-OES、火焰原子吸收光谱(FAAS)、石墨炉原子吸收光谱、X 射线荧光光谱(XRFS)、火焰发射光谱。此外,痕量分析则需要不同的方法库。60 多年

来,电弧-OES已成为一种常规的地质分析手段,其最大的优势在于样品制备简单,只需将样品碾碎,并与石墨及可能需要的缓冲液混匀即可.电火花-OES则在快速分析中得到广泛的应用.XRFS的样品制备相对简单,包括直接将碾碎的样品制成坯块或用各种熔融方法获得.一般,XRFS可以简单并很好地测定高浓度的元素.重量分析法、滴定法和比色法则提供了经证实是有效的、具有最高准确度的方法集.

样品经溶解步骤必须完全溶解,典型的不易溶的元素为:Cr, Ti, Zr 和 W. 由于使用助溶剂,常常导致因重盐的存在而堵塞喷雾系统,从而引起喷雾问题,分析富硅的材料尤为麻烦.溶液技术,如比色法和 FAAS,一般要求样品与助溶剂比率为 1:5 或 1:7. 将硅酸盐岩石和熔渣 1:1 熔融,然后用 ICP-OES 分析,而不用 FAAS 分析,因为 ICP-OES 炽热的等离子体会分解已溶解的大量的络合物.若在比色分析时,测定延迟了几小时,则在溶液中发生的硅酸盐和铝酸盐的聚合,会导致结果偏低.在痕量分析中,通过离子交换进行预先富集,并通过溶剂萃取除去干扰物是十分有用的.

HF-HClO₄ 消解液经常用于含量较低的痕量元素的测定.使用时不得加热过度使混合液蒸干或近干,以免又生成难熔氧化物.最好使用水浴或红外线加热器加热.只有采用 HF-HCl 加硼酸的封闭式消解系统,才可防止硅的挥发损失(以 SiF₄ 的形式).

富含碳酸盐的沉淀很易溶于冷或温的稀酸中,从而将碳酸盐与样品的其他组成成分分开.热的盐酸和盐酸羟胺或柠檬酸可用来溶解金属的氢氧化物.

表 21.3 矿物表

本表内容及与表 21.4 的联系请参见 21.2 节第一段及第二段.将在表 21.4 中见到的矿物及物质的符号以字母顺序在下表中列出.

矿物代码	矿物名称	分子式	分析对象
1	霓石	NaFeSi ₂ O ₆	Ca, Fe, K, Mg, Na, Si
2	钠长石	NaAlSi ₃ O ₈	Al, K, Na, Si
3	褐帘石	(Ca, Ce, La, Na) ₂ (Al, Fe, Be, Mn, Mg) ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)	Al, Be, Ca, Ce, Fe, La, Mg, Mn, Na, R. E., Si
4	铁铝榴石(贵榴石)	Fe ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	Al, Fe, Si
5	明矾石	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Al, H ₂ O, K, S
6	锂磷铝石	Li(AlF)PO ₄	Al, F, Li, P
7	紫水晶	见矿物 210	
8	方沸石	NaAlSi ₂ O ₆ · H ₂ O	Al, Na, Si
9	锐钛矿	见矿物 214	
10	红柱石	Al ₂ SiO ₅	Al, Ca, Mg, Na, Si
11	硫酸铅矿(铅矾)	PbSO ₄	Pb, S
12	硬石膏(无水石膏)	CaSO ₄	Ca, S
13	钙长石	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Al, Ca, K, Na, Si
14	歪长石	(Na, K)AlSi ₃ O ₈	Al, Ca, K, Na, Si
15	块铜矾	Cu ₃ (SO ₄)(OH) ₄	Cu, S
16	磷灰石	(CaF)Ca ₄ (PO ₄) ₃	Ca, F, P
16a	磷灰石	(CaCl)Ca ₄ (PO ₄) ₃	Ca, Cl, P
17	鱼眼石	KCa ₄ FSi ₄ O ₁₀ · 8H ₂ O	Ca, F, H ₂ O, K, Na, Si

续表

矿物代码	矿物名称	分子式	分析对象
18	霏石(文石)	CaCO_3	$\text{CO}_2, \text{Ca}, \text{Mg}$
19	砂屑岩	Ag_2S	Ag, S
20	毒砂(砷黄铁矿)	FeAsS	$\text{As}, \text{Fe}, \text{S}$
21	绿盐铜矿	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	$\text{Cl}, \text{Cu}, \text{H}_2\text{O}$
22	纤滑石	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$	$\text{Al}, \text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mg}, \text{Si}$
23	钙铀云母	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2\text{P}_2\text{O}_8 \cdot 10\text{-}12\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}, \text{H}_2\text{O}, \text{P}, \text{U}$
24	斧石	$\text{H}(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{Fe})_3\text{Al}_2\text{B}(\text{SiO}_4)_4$	$\text{Al}, \text{B}, \text{Ca}, \text{Fe}, \text{H}_2\text{O}, \text{Mn}, \text{Si}$
25	蓝铜矿(石青)	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	$\text{CO}_2, \text{Cu}, \text{H}_2\text{O}$
26	斜锆石(二氧化锆矿)	ZrO_2	$\text{Hf}, \text{Si}, \text{Ti}, \text{Zr}$
27	重晶石	BaSO_4	$\text{Ba}, \text{Ca}, \text{S}, \text{Sr}$
28	硅铅矿	$\text{Pb}_3\text{Si}_2\text{O}_7$	$\text{Fe}, \text{Pb}, \text{Si}$
29	钡解石(斜钡钙石)	$\text{BaCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$	$\text{Ba}, \text{CO}_2, \text{Ca}$
30	氟碳铈矿	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Dy})(\text{CO}_3)\text{F}$	$\text{CO}_2, \text{F}, \text{R. E.}$
31	铝土矿(铁铝氧石, 铁矾土)	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}, \text{Fe}, \text{H}_2\text{O}, \text{Si}, \text{Ti}$
32	绿柱玉(绿柱石)	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	$\text{Al}, \text{Be}, \text{Si}$
33	磷酸钠铍石	NaBePO_4	$\text{Be}, \text{Na}, \text{P}$
34	铈钛铀矿(钛酸铈酸铀矿)	$(\text{U}, \text{Ca})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_3\text{O}_9 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}, \text{H}_2\text{O}, \text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti}, \text{U}$
35	黑云母	$(\text{H}, \text{K})_2(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	$\text{Al}, \text{Fe}, \text{H}_2\text{O}, \text{K}, \text{Si}$
36	辉铋矿	Bi_2S_3	Bi, S
37	泡铋矿	$\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{Bi}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$
37a	一水软铝石(勃姆石)	见矿物 82	
38	方硼石	$\text{Mg}_7\text{Cl}_2\text{B}_{16}\text{O}_{20}$	$\text{B}, \text{Cl}, \text{Mg}$
39	硼砂	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$\text{B}, \text{H}_2\text{O}, \text{Na}$
40	斑铜矿	Cu_5FeS_4	$\text{Cu}, \text{Fe}, \text{S}$
41	硫锑铅矿	$\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$	$\text{Ag}, \text{Pb}, \text{S}, \text{Sb}$
42	车轮矿(硫化锑铅铜矿)	PbCuSbS_3	$\text{As}, \text{Cu}, \text{Pb}, \text{S}, \text{Sb}$
43	褐锰矿(共析氮化铁)	$\text{Mn}_7\text{SiO}_{12}$	Mn, Si
44	水胆矾(水硫酸铜矿)	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	$\text{Cu}, \text{Fe}, \text{S}$
45	碳酸钙钡矿	见矿物 29	
46	溴银矿	AgBr	Ag, Br
47	板钛矿	TiO_2	Ti
48	水镁石(天然氢氧化镁)	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	$\text{H}_2\text{O}, \text{Mg}$
49	异极矿(菱锌矿, 水锌矿)	$\text{H}_2\text{Zn}_2\text{SiO}_5$	Si, Zn
50	碲金矿	AuTe_2	$\text{Ag}, \text{Au}, \text{Te}$
51	方解石(碳酸钙)	见矿物 18	
52	汞膏(甘汞, 汞膏矿)	HgCl	Cl, Hg
53	光卤石(砂金卤石)	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Cl}, \text{K}, \text{Mg}$
53a	拉长石	$\text{K}_2(\text{UO}_3)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	U, V
54	锡石	SnO_2	Sn
55	天青石	SrSO_4	S, Sr
56	角银矿	AgCl	Ag, Cl
57	锗硅石	$(\text{Ca}, \text{Fe})(\text{CeO})(\text{OH})_3\text{Ce}_2(\text{SiO}_3)_3$	$\text{Ce}, \text{H}_2\text{O}, \text{La}, \text{R. E.}, \text{Si}$

续表

矿物代码	矿物名称	分子式	分析对象
58	白铅矿	PbCO_3	$\text{CO}_3, \text{H}_2\text{O}, \text{Pb}$
59	黄锑矿(锑赭石, 白安矿)	$\text{Sb}_2\text{O}_3 \cdot \text{Sb}_2\text{O}_5$	Sb
60	菱沸石	$(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})_7\text{Al}_{12}(\text{Al}, \text{Si})_2\text{Si}_{24}\text{O}_{50} \cdot 40\text{H}_2\text{O}$	Al, Ca, H_2O , K, Na, Si
61	胆矾(蓝矾, 五水硫酸铜)	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Cu, H_2O , S
62	辉铜矿	Cu_2S	Cu, S
63	羟砷铜矾	$\text{Cu}_{18}\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{27} \cdot 33\text{H}_2\text{O}$	Al, As, Cu, H_2O , S
64	黄铜矿	CuFeS_2	Au, Cu, Fe, S
65	绿脱石(杂绿脱蛋白硅石)	$\text{H}_6\text{Fe}_7\text{Si}_3\text{O}_{12} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Fe, H_2O , Si
66	粒硅镁石	$\text{Mg}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{F}, \text{OH})_2$	F, H_2O , Mg, Si
67	铬铁矿	$(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_4$	Al, Cr, Fe, Mg, Si
68	硅孔雀石	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Cu, H_2O , Si
69	贵橄榄石(橄榄石, 磷灰石)	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$	Fe, Mg, Si
70	辰砂(朱砂)	HgS	Hg, S
71	斜绿泥石	$\text{H}_5(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{18}$	Al, Fe, H_2O , Mg, Si
72	煤(石炭)	C	C, S
73	辉钴矿	CoAsS	As, Co, Ni, S
74	硬硼钙石	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	B, Ca, H_2O
75	钶铁矿(钶铁矿)	$(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$	Fe, Mn, Nb, Sn, Ta, Ti
76	天然铜	Cu	Cu
77	刚玉(金刚砂)	Al_2O_3	Al, Fe, Si
78	冰晶石	Na_3AlF_6	Al, F, Na
79	赤铜矿	Cu_2O	Cu
80	硅灰硼石(硅钙硼石)	HCaBSiO_5	B, Ca, Si
81	钒铅锌矿	$(\text{Zn}, \text{Cu})\text{Pb}(\text{VO}_4)\text{OH}$	Cu, H_2O , Pb, V, Zn
82	水铝石(水矾石, 水矾土)	$\text{AlO}(\text{OH})$	Al, H_2O , Si
83	透辉石	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Ca, Mg, Si
84	绿铜矿	H_2CuSiO_4	Cu, H_2O , Si
85	绿磷铁矿	$\text{Fe}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Fe, H_2O , P
86	白云石(石灰岩, 大理石)	$(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$	CO_2 , Ca, Mg
87	硫砷铅矿	$\text{Pb}_2\text{As}_2\text{S}_5$	As, Pb, S
88	绿铁碲矿	$\text{Fe}_2(\text{TeO}_3)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Fe, H_2O , Te
89	安银矿(锑银矿)	Ag_3Sb	Ag, Sb
90	硫砷铜矿	$3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{As}_2\text{S}_5$	As, Cu, S
91	顽辉石	MgSiO_3	Mg, Si
92	磷铝锰矿	$(\text{Mn}, \text{Fe})\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Al, Fe, H_2O , Mn, P
93	绿帘石	$\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$	Al, Ca, Fe, Si
94	绿点板岩	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	H_2O , Mg, S
95	钴华(砷钴石)	$\text{Co}_3\text{As}_2\text{O}_8 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	As, Co, H_2O , Ni
96	硒铜银矿	$\text{Cu}_2\text{Se} \cdot \text{Ag}_2\text{Se}$	Ag, Cu, Se
97	蓝柱石	HBeAlSiO_5	Al, Be, Si

续表

矿物代码	矿物名称	分子式	分析对象
98	黑稀金矿	$(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$	Ca, Ce, Nb, R. E., Ta, Th, Ti, U, Y
99	钨铁矿	$FeWO_4$	Ca, Fe, Mn, Mo, Sn, W
100	褐钨铌矿(褐钨铌矿)	$(Y, Er, Ce, Fe)(Nb, Ta, Ti)O_4$	Ce, Er, Fe, Nb, R. E., Ta, Ti, Y
101	萤石(氟石)	CaF_2	CO_2 , Ca, F, Si
102	锌铁尖晶石(锌铁矿)	$(Fe, Zn, Mn)O \cdot (Fe, Mn)_2O_3$	Fe, Mn, Zn
103	硅铍钇矿	$Be_2FeY_2Si_2O_{10}$	Be, Fe, R. E., Si, Y
104	方铅矿	PbS	Cu, Fe, Ge, In, Pb, S, Zn
105	石榴石	$(Ga, Mg, Fe, Mn)_3(Al, Fe, Cr)_2(SiO_4)_3$	Al, Ca, Cr, Fe, FeO, Mg, Mn, Si
106	镍水蛇纹石	$2NiO \cdot 2MgO \cdot 3SiO_2 \cdot 6H_2O$	H_2O , Mg, Ni, Si
106a	亚锗酸盐(锗石)	$(Cu, Ge)(S, As)$	Ge
107	硅华	$NiAsS$	As, Co, Ni, S
108	水铝矿	$Al(OH)_3$	Al, Fe, H_2O , Si
109	硬沥青(黑沥青, 天然沥青)	天然沥青	C(包括灰态和挥发态)
110	钙芒硝	$Na_2Ca(SO_4)_2$	Ca, Na, S
111	铁硫砷钴矿	$(Co, Fe)AsS$	As, Co, Fe, Ni, S
112	蓝闪石	$NaAl(SiO_3)_2 \cdot (Fe, Mg)SiO_3$	Al, Fe, Mg, Na, Si
113	天然金	Au 通常在石英中	Au
114	石墨	C	C(包括灰态和挥发态)
115	硫镉矿	CdS	Cd, Zn
116	脂铅铀矿	U 氧化物 + H_2O	U
117	石膏	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Ca, H_2O , S
118	石盐(岩盐)	$NaCl$	Cl, Na
119	埃洛石(变埃洛石)	$H_4Al_2Si_2O_9$	Al, H_2O , Si
120	碳酸芒硝	$Na_{22}K(SO_4)_9(CO_3)_2Cl$	CO_2 , K, Na, S
121	黑锰矿	$MnMn_2O_4$	Mn, MnO_2
122	钙铁辉石	$CaFeSi_2O_6$	Ca, Fe, Si
123	赤铁矿	Fe_2O_3	Fe, P, S, Si
124	异极矿	$Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$	H_2O , Si, Zn
125	片沸石	$(Ca, Na, K)_6Al_{10}(Al, Si)_{Si_{29}}O_{30} \cdot 25H_2O$	Al, Ca, H_2O , K, Na, Si
126	角闪石	$(Ca, Na)(Mg, Fe)_4(Al, Fe, Ti)_3Si_6O_{22}(O, OH)_2$	Al, Ca, Fe, H_2O , Mg, Na, Si, Ti
127	钨锰矿	$MnWO_4$	Ca, Fe, Mn, Mo, Sn, W
128	钡冰长石	$(K_2, Ba)Al_2Si_4O_{12}$	Al, Ba, K, Si
129	水白铅矿	$2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$	见矿物 58 白铅矿
130	紫苏辉石	$(Fe, Mg)SiO_3$	Fe, Mg, Si
131	钛铁矿	$FeTiO_3$	Cr, Fe, Si, Ti, V
132	碘银矿	AgI	Ag, I
133	硬玉, 翡翠	$NaAl(SiO_3)_2$	Al, Na, Si
134	脆硫锑铅矿	$Pb_2Sb_2S_5$	Pb, S, Sb

续表

矿物代码	矿物名称	分子式	分析对象
135	黄钾铁矾	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_4$	Fe, H ₂ O, K, S
136	钾盐镁矾	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Cl, K, Mg, S
137	高岭土, 瓷土	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Al, H ₂ O, Si
138	四水硼砂	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	B, H ₂ O, Na
139	硫酸镁石	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	H ₂ O, Mg, S
140	斜方碲金矿	$\text{Au}_8\text{Te}_{16}$	Ag, Au, Te
141	蓝晶石	见矿物 10	
142	拉长石(富拉玄武岩, 淡辉长岩)	介于钠长石和钙长石之间	Al, Ca, K, Na, Si
143	天蓝石	$(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Al}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2$	Al, Fe, H ₂ O, Mg, P
144	天青石(青金石)	$\text{Na}_4\text{--}_5\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{S}$	Al, Na, S, Si
145	硫碳铅矿	$\text{Pb}_4(\text{SO}_4)(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	CO ₂ , H ₂ O, Pb, S
146	锂云母	$\text{KLi}[\text{Al}(\text{OH}, \text{F})_2]\text{Al}(\text{SiO}_3)_3$	Al, Cs, F, H ₂ O, K, Li, Rb, Si
147	白榴石	$\text{KAl}(\text{SiO}_3)_2$	Al, K, Si
148	磷铜矿(羟磷铜矿)	$\text{Cu}_2(\text{OH})\text{PO}_4$	Cu, H ₂ O, P
149	褐铁矿	$\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Fe, H ₂ O, P, Si
150	硫钴矿	Co_3S_4	Co, Cu, Fe, Ni, Si
151	磷锰锂矿	$\text{Li}(\text{Fe}, \text{Mn})\text{PO}_4$	Cs, Fe, Li, Mn, Na, P, Rb
152	菱镁矿	MgCO_3	CO ₂ , Ca, Mg
153	磁铁矿	Fe_3O_4	Fe, FeO, S, Ti
154	孔雀石	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	CO ₂ , Cu, H ₂ O
155	水锰矿	$\text{MnO}(\text{OH})$	H ₂ O, Mn, MnO ₂
156	白铁矿	FeS_2	Fe, S
157	珍珠(珍珠云母)	$\text{H}_2\text{CaAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{12}$	Al, Ca, H ₂ O, Si
158	钠柱石	$\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{24}(\text{Cl}, \text{CO}_3, \text{SO}_4)$	Al, CO ₂ , Ca, Cl, Na, S, Si
158a	铁闪锌矿	矿物 229 含 FeS	Fe, Pb, S, Zn
159	钙柱石	$\text{Ca}_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{Cl}, \text{CO}_3, \text{SO}_4)$	Al, CO ₂ , Ca, Cl, Na, S, Si
160	辉锑铅矿	$\text{Pb}_4\text{Sb}_2\text{S}_7$	Pb, S, Sb
161	辉锑银矿	AgSbS_2	Ag, S, Sb
162	微斜长石	KAlSi_3O_8	Al, K, Na, Si
163	微晶(细晶石)	$(\text{Na}, \text{Ca})_2\text{T}_{a_2}\text{O}_6(\text{O}, \text{OH}, \text{F})$	Ca, F, H ₂ O, Na, Nb, Sn, Ta, Ti
164	针镍矿	NiS	As, Co, Cu, Ni, S
165	砷铅矿	$\text{Pb}_6(\text{AsO}_4, \text{PO}_4)_3\text{Cl}$	As, Cl, P, Pb
166	芒硝(硫酸钠矿)	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	H ₂ O, Na, S
167	辉钼矿	MoS_2	Cu, Mo, Re, S
168	独居石	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Y}, \text{Th})(\text{PO}_4)$	Ce, La, R. E., P, Th, Zr
169	蒙脱石(胶岭石, 高岭石)	$\text{H}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$	Al, Ca, Fe, H ₂ O, K, Na, Si
170	钒铜铅矿	$(\text{Cu}, \text{Zn})\text{Pb}(\text{VO}_4)\text{OH}$	Cu, H ₂ O, Pb, V, Zn
171	白云母	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Al, H ₂ O, K, Si
172	钠沸石(中柱石)	$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Al, Ca, H ₂ O, K, Na, Si
173	霞石	$(\text{Na}, \text{K})(\text{Al}, \text{Si})_2\text{O}_4$	Al, K, Na, Si
174	红砷镍矿	NiAs	As, Ni, S, Sb
175	硝石	KNO_3	K, N, Na

续表

矿物代码	矿物名称	分子式	分析对象
176	奥长石	介于钠长石和钙长石之间	Al, Ca, K, Na, Si
177	橄榄铜矿	$\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$	As, Cu, H ₂ O
178	橄榄石	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$	Mg, Fe, Si
179	蛋白石(猫眼石, 乳色玻璃)	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	H ₂ O, Si
180	雌黄	As_2S_2	As, S
181	褐帘石	见矿物 3	
182	正长石	KAlSi_3O_8	Al, Ca, K, Mg, Na, Si
182a	铱铱矿	(Os, Ir)	Ir, Os, Pd, Pr, Rh, Ru
183	天然钯	Pd	Ir, Pd, Pt
184	钠云母	$\text{H}_2\text{NaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}$	Al, H ₂ O, K, Na, Si
185	氟菱钙铈矿(氟碳钙铈矿)	$(\text{Ce}, \text{La})_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$	CO_2 , Ca, Ce, F, La, R. E.
186	针钠钙石	$\text{Ca}_2\text{NaSi}_3\text{O}_3(\text{OH})$	Ca, H ₂ O, Na, Si
187	方镁石	MgO	Fe, H ₂ O, Mg
188	钙钛矿	CaTiO_3	Ca, Ce, Fe, La, R. E., Ti
189	透锂长石	$\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$	Al, Li, Na, Si
190	硅铍石	Be_2SiO_4	Al, Be, Si
191	钙十字沸石(斑铜矿)	$(\text{K}, \text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$	Al, Ca, H ₂ O, K, Na, Si
192	金云母	$\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Al, F, H ₂ O, K, Mg, Na, Si
193	角铅矿	$\text{Pb}_2(\text{CO}_3)\text{Cl}_2$	CO_2 , Cl, Pb
194	磷铀矿	$\text{Ca}(\text{UO}_2)\text{PO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Ca, H ₂ O, P, U
195	沥青铀矿	见矿物 260	
196	天然铂	Pt	Ir, Os, Pd, Pt
197	黝锰矿	见矿物 209	
198	铯榴石	$\text{H}_2\text{Cs}_4\text{Al}_4(\text{SiO}_3)_9$	Al, Cs, H ₂ O, K, Rb, Si
199	硫锑铜银矿	$(\text{Ag}, \text{Cu})_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$	Ag, Cu, S, Sb
200	复衡金矿(复烯金矿, 锗铀矿)	$(\text{Y}, \text{Ca}, \text{Ce}, \text{U}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$	Ca, Ce, Nb, R. E., Ta, Th, Ti, U, Y
201	杂卤石	$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Ca, H ₂ O, K, Mg, S
202	钼钨钙矿	CaMoO_4	Ca, Mo, W
203	葡萄石	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Al, Ca, H ₂ O, Si
204	淡红银矿(硫砷银矿)	Ag_3AsS_3	Ag, As, S, Sb
205	pailomelane	$\text{BaMnMn}_3\text{O}_{16}(\text{OH})_4$	Ba, Mn, MnO ₂ , P, Si
206	硫锑银矿(深红银矿)	Ag_3SbS_3	Ag, S, Sb
207	黄铁矿	FeS_2	Au, Fe, S, Ti
208	烧绿石	$\text{NaCaNb}_2\text{O}_6\text{F}$	Ca, Ce, F, La, Na, Nb, R. E., Sn, Ta, Ti
209	软锰矿	MnO_2	Ba, Mn, MnO ₂ , P, Si
210	石英(水晶)	SiO_2	Al, Au, Fe, Si
211	雄黄(鸡冠石)	AsS	As, S
212	菱锰矿	MnCO_3	CO_2 , Ca, Fe, Mg, Mn, Zn
213	蔷薇辉石	MnSiO_3	Ca, Fe, Mg, Mn, Si, Zn
214	金红石	TiO_2	Cr, Fe, Si, Ti, V, Zr

续表

矿物代码	矿物名称	分子式	分析对象
215	铌钽矿	$(Y, Er, Ce, U, Ca, Fe, Pb, Th)(Nb, Ta, Ti, Sn)_2O_6$	Ca, Ce, Er, Fe, Nb, Pb, R. E., Sn, Ta, Th, Ti, U, Y
216	白钨矿(重石)	$CaWO_4$	As, Ca, Fe, Mn, Mo, S, Sn, W
217	臭葱石	$Fe(AsO_4) \cdot 2H_2O$	As, Fe, H_2O
218	多铁天蓝石	$(Fe, Mg)Al_2(PO_4)_2(OH)_2$	Al, Fe, H_2O , Mg, P
219	天然硒	Se	Se, Te
219a	透明石膏	见矿物 117	
220	菱铁矿(陨铁)	$FeCO_3$	CO_2 , Fe
221	硅线石	见矿物 10	
222	天然银	Ag	Ag
223	钾镁红闪石(羟钽铝石)	$Al_2Ta_2O_3$	Al, Nb, Sn, Ta, Ti
224	方钴矿	$(Co, Ni)As_3$	As, Co, Fe, Ni, S
225	砷钴矿	见矿物 224	
226	菱锌矿(异极矿)	$ZnCO_3$	CO_2 , Ca, Fe, Mg, Mn, Zn
227	天然硝石	$NaNO_3$	K, N, Na
228	方钠石(钠沸石)	$Na_4Al_3Si_3O_{12}Cl$	Al, Ca, Cl, K, Na, Si
229	闪锌矿	ZnS	Cd, Cu, Fe, Ga, Ge, In, Mn, Pb, S, Tl, Zn
230	尖晶石	$MgAl_2O_4$	Al, Fe, Mg, Si
231	锂辉石	$LiAlSi_2O_6$	Al, Fe, K, Li, Na, Si
232	黄锡矿(黝锡矿)	Cu_2FeSnS_4	Cu, Fe, S, Sn, Zn
233	十字石	$(Fe, Al)_4Si_2O_{10}(OH)_2$	Al, Fe, H_2O , Mg, Si
234	脆银矿	Ag_5SbS_3	Ag, S, Sb
235	辉锑矿	Sb_2S_3	As, Pb, S, Sb
236	黄锑华	$(Ca, Na)_3Al_5(Al, Si)Si_{14}O_{40} \cdot 15H_2O$	Al, Ca, H_2O , Na, Si
237	菱锶矿	$SrCO_3$	Ba, CO_2 , Ca, Sr
238	硫磺	S	S, Se
239	针碲金银矿	$(Au, Ag)Te_2$	Ag, Au, Pb, Te
240	钾石盐	KCl	Cl, K, Na
241	滑石(云母)	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Al, Fe, H_2O , Mg, Si
242	钽铁矿	见矿物 75	
243	重钽铁矿	$FeTa_2O_6$	Fe, Mn, Nb, Sn, Ta, Ti
244	碲	Te	Se, Te
245	砷黝铜矿	$(Cu, Fe)_{12}As_4S_{13}$	As, Cu, Fe, S
246	辉碲铋矿(辉碲铋矿, 辉碲铋矿)	Bi_2Te_2S	Bi, S, Se, Te
247	黝铜矿	$(Cu, Fe)_{12}Sb_4S_{13}$	Cu, Fe, S, Sb
248	无水芒硝	Na_2SO_4	Na, S
249	钍矿(硅酸钍矿)	$ThSiO_4$	Ce, La, Pb, R. E., Si, Th, U
250	榍石(钛铁矿)	$CaTiSiO_5$	Ca, Fe, Si, Ti
251	黄玉(黄玉矿, 黄精)	$Al_2SiO_4(F, OH)_2$	Al, F, H_2O , K, Na, Si
252	铜铀云母	$Cu(UO_2)(PO_4)_2 \cdot 8-12H_2O$	As, Cu, H_2O , P, U

续表

矿物代码	矿物名称	分子式	分析对象
253	电英岩	$(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Fe}, \text{Mg})_3\text{B}_3\text{Al}_3(\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{27})(\text{OH})_4$	Al, B, Ca, Fe, Li, Mg, Na, Si
254	硅酸镁钙(透闪石)	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Cs, H ₂ O, Mg, Si
255	磷铁锂矿(锂蓝铁矿, 磷铁锂矿)	LiFePO_4	Fe, Li, Mn, P
256	天然碱	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3$	CO ₂ , H ₂ O, Na
257	绿宝石(绿松石)	$\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Al, Cu, H ₂ O, P
258	钒钙铀矿	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Ca, H ₂ O, U, V
259	硼钠钙石(钠硼解石)	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	B, Ca, H ₂ O, Na
260	晶质铀矿(沥青铀矿, 方铀矿)	UO_2	He, Pb, U
261	硅钙铀矿	$\text{CaU}_2\text{Si}_2\text{O}_{11} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Ca, H ₂ O, Si, U
262	钒铅矿	$\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$	Cl, Pb, V
263	磷铝石	$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Al, P
264	蓝铁矿	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Fe, H ₂ O, P
265	银星石	$\text{Al}_3(\text{OH})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Al, F, H ₂ O, P
266	硅锌矿(天然硅酸锌)	Zn_2SiO_4	Fe, Mn, Si, Zn
267	碳酸钡矿	BaCO_3	Ba, CO ₂ , S, Sr
268	钨锰铁矿(铁锰重石)	$(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{WO}_4)$	Ca, Fe, Mn, Mo, S, Sn, W
269	硅酸钙岩矿(钙硅石)	CaSiO_3	Ca, H ₂ O, Mg, Si
270	钼铅矿	PbMoO_4	Ca, Mo, Pb
271	磷钇矿	YPO_4	Er, La, R. E., P, Th, U, Y, Zr
272	钽钇矿(钽钽铁矿)	$(\text{Fe}, \text{Y}, \text{U}, \text{Ca})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Zr}, \text{Sn})\text{O}_4$	Ca, Fe, Nb, R. E., Sn, Ta, U, Y
273	铁锂云母	$\text{H}_2\text{K}_4\text{Li}_4\text{Fe}_3\text{Al}_5\text{F}_8\text{Si}_{14}\text{O}_{42}$	Al, Fe, H ₂ O, Li, Si
274	锆石	ZrSiO_4	Fe, Hf, Si, Ti, Zr
275	黝帘石	$\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3\text{OH}$	Al, Ca, H ₂ O, Mg, Si

资料来源: L. Meites, ed., *Handbook of Analytical Chemistry*, McGraw-Hill, New York, 1963.

表 21.4 矿物分析步骤表

此表代码所指的矿物的分析步骤, 参见 21.2 节第一段及第二段. 表的第一列按照元素和物质符号的首字母顺序排列, 第二列代码在每一条目中按顺序排列. 为完备起见, 有些物质(如测定稀有气体, 测定盐水和海水中的碘, 等等)的分析步骤也收于此表中, 而这些物质未在表 21.3 中列出.

测定元素	矿物代码	分解方式	干扰元素	分离类型	步 骤
A	空气, 含钾矿物			液态空气分馏	质谱
Ag	19, 41, 46, 50, 56, 59, 96, 132, 140, 161, 199, 204, 206, 222, 234, 239	与 助 熔 剂 Na_2CO_3 , $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$, PbO + 还原剂 熔融	所有元素	铅析法和烤鉢试 金法: 见 Au	铅析法: 加热使熔融而得的 Pb 扣氧化. 部分 Pb 氧化为 PbO . 将 Pb 扣与一骨灰皿共热至 Pb 全被吸收. 称量得到的 (Ag + Au) 珠, 用 HNO_3 溶 Ag 后称重, 差为 Ag 的重量

续表

测定元素	矿物代码	分解方式	干扰元素	分离类型	步 骤
Al	2, 4, 8, 10, 13, 14, 22, 24, 35, 60, 71, 93, 105, 112, 125, 126, 133, 137, 142, 144, 146, 147, 157, 158, 159, 162, 169, 171, 172, 173, 176, 182, 184, 189, 191, 192, 198, 203, 228, 230, 231, 233, 236, 241, 251, 253, 273, 275	用 Na_2CO_3 熔融	Si Na, K, Li, Ca, Mg, Fe	用 HCl 溶液脱水 NH_3 沉淀除 Al 铜铁试剂沉淀除 Fe	浸出的 CO_3^{2-} 与稀 HCl 共溶而除去, 溶液蒸干, 滤去脱水 SiO_2 用 NH_3 溶液沉淀 Al, Fe 和 Ti (若存在大量 Ca, 则需再次沉淀), $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$ 冒烟后水溶, 用铜铁试剂沉淀除去 Fe 和 Ti, 滤液中 Al 用 NH_3 溶液沉淀, 灼烧, 称量所得的 Al_2O_3
		同 上	Ca, Fe, K, Li, Mg, Na, Si Ba	同 上 以 BaSO_4 沉淀除去	同 上
	32, 97, 190	同 上	Ca, Fe, K, Li, Mg, Na, Si	同 上	同上, 但用 8-羟基喹啉代替 NH_3 沉淀 Al, 称量 Al $(\text{C}_9\text{H}_6\text{ON})_3$ 的重量
			Be	8-羟基喹啉沉淀 Al	
	6, 9, 143, 218, 263, 265	同 上	Ca, Fe, K, Li, Mg, Na, Si	同 上	除 SiO_2 同上, 用过量的钼酸铵沉淀 PO_4^{3-} , 然后沉淀 Al, Fe 和 Ti, 其余同上
			PO_4^{3-}	钼酸铵沉淀 PO_4^{3-}	
	3	同 上	Ca, Fe, K, Li, Mg, Na, Si R. E.	同 上 氧化, 沉淀	同上, 但酸溶 Al-Fe-Ti 沉淀后, 用过量的 H_2O_2 沉淀 R. E., 以 $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$ 破坏 H_2O_2 , 接着用铜铁试剂沉淀, 其余同上
	63, 257	热浓 H_2SO_4	Cu, As	H_2S 沉淀	除去 H_2S 相关元素, 然后钼酸铵沉淀 PO_4^{3-}
	78	热浓 H_2SO_4	Na	NH_3 沉淀	赶出 HF, 用 NH_3 溶液沉淀 Al, 灼烧, 称量所得的 Al_2O_3
	5 31, 82, 108, 119	稀 HCl $\text{HNO}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$	SO_4^{2-} , K Si	NH_3 沉淀 蒸发, 脱水	灼烧, 称量所得的 Al_2O_3 蒸干溶液, 灰化, 溶解, 过滤除 SiO_2 , 用 NH_3 沉淀 R_2O_3 基团, 灼烧, 校正 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5$, 或测定 Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 和 TiO_2 , 通过差量法确定 Al_2O_3
	67	热 HClO_4	Si	蒸发, 脱水	

续表

测定元素	矿物代码	分解方式	干扰元素	分离类型	步 骤
As	77	KHSO ₄ 熔融	Cr	NH ₃ 沉淀 Al 或 Hg 作阴极电解	NH ₃ 沉淀, 称量所得的 Al ₂ O ₃
			Mg	NH ₃ 沉淀 Al	
			Fe	铜铁试剂沉淀 Fe 或 Hg 作阴极电解	
			Si	与 H ₂ SO ₄ 共热, 稀释, 过滤	同 上
			Fe, Ti	铜铁试剂沉淀	
As	223	KHSO ₄ 熔融	Ta, Nb, Fe, Sn	铜铁试剂沉淀	同 上
	210	HF 分解	Fe	铜铁试剂沉淀	同 上
	20, 42, 63, 73, 87, 90, 95, 107, 111, 164, 165, 174, 177, 180, 204, 211, 216, 217, 224, 235, 245, 252,	热 H ₂ SO ₄ + KHSO ₄	所有元素	蒸馏 AsCl ₃	100℃ 时, 从 9mol/L HCl 中 (含还原剂 FeSO ₄ , N ₂ H ₄ · 2HCl 或 KBr) 蒸馏 AsCl ₃ , NH ₃ 溶液中和馏分, 用 HCl 酸化, 加入 NaHCO ₃ 与标准 I ₂ 溶液一起搅拌. 或 (若 As 含量 < 50mg) 用 H ₂ S 沉淀馏分得 AsS ₃ , 过滤, 称重
					渣化 (氧化) Pb 扣, 灰吹 (用骨灰吸收 PbO), 组分分离 (HNO ₃ 溶解除 Ag), 称 Au 重量
Au	50, 64, 113, 140, 207, 210, 239	与 PbO, SiO ₂ 和 (或) Na ₂ CO ₃ + 还原剂共熔	Pb, Cu, Ag	燃烧分析方法	
B	38, 39, 74, 138, 259	水或稀 HCl	R ₂ O ₃ 元素	过量 BaCO ₃ 或 CaCO ₃ 沉淀	用 NaOH 稀溶液中和微溶酸性溶液至 pH 5.5, 加入过量甘露醇, 用 0.1mol/L NaOH 搅拌硼酸溶液至 pH 7.5
Ba	24, 80, 253	用 Na ₂ CO ₃ 熔融	SiO ₂ , R ₂ O ₃	酸化滤液和滤出物, HCl 溶解, SiO ₂ + R ₂ O ₃ 用 BaCO ₃ 或 CaCO ₃ 沉淀	同 上
	29, 205, 209, 237, 267	HCl	Mn	以 BaSO ₄ 沉淀	H ₂ SO ₄ 加入 HCl 的稀溶液沉淀出 BaSO ₄ , 过滤, 灼烧
			Ca	以 BaCrO ₄ 或 BaCl ₂ 沉淀	
Be	27, 128	Na ₂ CO ₃ 熔融	Si, SO ₄ ²⁻	过滤 Na ₂ CO ₃ 熔融物	同 上
	3, 32, 33, 97, 103, 190	Na ₂ CO ₃ 熔融	Si	在 HCl 中脱水, 过滤	从 8-羟基喹啉沉淀的滤出液中, 用 NH ₃ 沉淀出 Be,