

器和工具。应用新技术、新方法、新手段，加强基础地质工作，重视成矿理论的试验研究工作，掌握成矿规律，正确推断解释各种地质找矿信息，找出更多、更好的矿产资源，为“四化”建设服务。

新的技术革命，要求知识高度密集的技术，需要众多的技术专家和熟练劳动者。知识的生产力将成为整个社会生产力和经济增长的主要因素。因此，要尊重知识，尊重人才，加快智力资源开发的步伐，把科学技术和教育

工作放在重要地位。相信在新的技术革命的浪潮中，在我国辽阔的陆地和海域上，经过广大地质工作者的奋发努力，沿着社会主义道路，为新兴工业的需要，寻找出更多、更好的矿产资源，为赶超世界先进水平作贡献。

## 矿物包裹体研究现状及其发展趋势

喻 铁 阶

近二十年来，矿物包裹体的研究发展很快，理论上取得了新的进展，研究方法上不断革新，数据应用范围也日益扩大。目前，包裹体研究已可为地质研究提供成矿热液（或熔融体）的温度、压力、盐度、密度、初熔温度、气相和液相成分、稳定同位素组成、不混溶特征、成矿年龄、爆裂活度、pH和Eh值等十多种参数，并广泛应用于地质找矿、理论研究等方面。

### 包裹体理论的进展

一、不混溶包裹体的研究 自1958年索尔比等人确定了包裹体研究的三条基本假定以来，地质界一直认为包裹体仅是从均匀体系中圈闭的。但是，最近研究表明，它也可以从不均匀体系中圈闭出来。对这种不混溶包裹体的研究，冲破了旧的理论，开辟了新的研究途径。

1. 不混溶包裹体是从岩浆到热液过渡状态的证据。研究它可解决岩浆—热液的演化过程，热液的来源等问题。进而研究岩石和矿床的相互关系，扩大了包裹体研究的范围。

2. 研究地壳中不同流体的相互关系。以变质岩的研究为例，现已得知，变质岩包裹体常常是 $H_2O-CO_2$ 不混溶体系，从浅变质岩到深变质岩到超深变质岩，包裹体中 $CO_2$ 含量从少到多，某些麻粒岩相岩石中的包裹体甚至为纯 $CO_2$ 包裹体，超深变质岩可形成碳质包裹体。再如某些铅锌矿石中有 $H_2O+油$ 不混溶体系包裹体，通过观测可解决各种流体之间的相互关系。

不混溶包裹体的研究尽管刚刚开始，但这一突破可能为地质研究提供许多新资料。

二、岩浆包裹体理论趋于完善 洛德（1979）总结了岩浆包裹体的形成机制、主要数据的获取及

其意义，为岩浆包裹体研究打下了较完整的理论基础。

三、流体包裹体体系研究有了新的发展 对 $NaCl+H_2O$ 、 $CO_2+H_2O$ 、 $NaCl+KCl+H_2O$ 等体系已做了许多详细的工作，编出了各种相图，对一些复杂体系也作了深入研究。不混溶包裹体将岩浆和热液联系起来研究，扩大了包裹体体系研究的范围，使体系研究从理论上发展了一步。

### 包裹体数据在地质上的应用

#### 一、数据应用的发展趋势

1. 国内外地质学者对包裹体数据的利用，可以归结为两个主要倾向。

（1）着重于找矿方法和找矿标志的研究。以苏联为代表的一些国家，比较重视这方面的工作。1976年召开的全苏温压地球化学会议上，提出苏联本世纪最后25年包裹体研究的规划，主要有：①查明不同区域岩石和地层的成矿作用、成矿远景和成因类型，确定普查、勘探和评价矿床的途径。主要利用热晕、蒸发晕、砂粒爆破法和气晕等找矿方法。

②金属矿床包裹体标志、岩石的成矿专属性研究。③据包裹体特征编制不同类型矿床的成矿模式，进行成矿预测。④各类岩浆岩包裹体特征的研究，岩浆成矿系列的包裹体标志等。⑤成矿物理化学条件，如物质聚集状态、温度、压力、金属搬运形式等。⑥各种成矿构造的研究。

（2）着重于岩石和成岩成矿环境的研究。美国等西方国家偏重于岩石，尤其是岩浆岩包裹体的研究；对变质岩和沉积岩也很重视，包裹体数据常用于解决各类岩石和矿床的形成、发展和演化等成岩成矿理论问题。目前用包裹体数据区分三大类岩石已有较肯定的结论。相反，应用于找矿的例子较

少,正如美国的洛德(1977)所说:“包裹体数据应用在直接找矿或扩大已知矿床范围方面的可能性,往往被西方国家的地质人员所忽视”。我国的包裹体研究多属于前一种。

2.应用范围从矿床学向岩石学扩展。过去的工作主要围绕着矿床进行,新的研究初步解决了区分三大类岩石的特征包裹体问题、从岩浆到热液的演化过程及地壳中不同流体相互关系问题。

**二、包裹体数据用于找矿** 热晕找矿法约在本世纪四十年代就提出来了,五十年代苏联耶尔马柯夫等人提出“蒸发晕”和“砂粒爆破法”在区域或矿区范围内用于寻找盲矿体。七十年代以来,由于各种测试方法的进步,发展了气晕、盐晕找矿法,岩体含矿性评价,预测隐伏矿化和气体评价矿床的标志等有意义的找矿评价方法。目前苏联已发表了上百篇这类文章,我国对斑岩铜矿、铅锌矿、金矿等矿种也进行了试验,取得了较好的效果。

#### 1. 包裹体数据用于直接找矿:

(1) 热晕、蒸发晕和砂粒爆破找矿法。原理是趋向热液矿体的方向上包裹体温度和数量有增加的趋势。这些晕一般超越矿体外几十或几百米,洛德概述了这方面几十个例子(《经济地质》,1977,第三期)。我国也有一些找矿实例(《地质与勘探》,1979,第6期;《科学通报》,1978,第7期)。热晕和蒸发晕找矿一般适用于矿区或勘探地段寻找盲矿体,砂粒爆破法可用于较大范围内的找矿与评价。

(2) 盐晕找矿法:原理是包裹体的盐度趋向矿体的方向上有增高的趋势,矿床的位置与高盐度包裹体的分布有关(典型例子见《经济地质》,1977,第三期)。我国江西富家坞、西藏玉龙斑岩铜矿均有这类例子。该法适用于有高盐度包裹体的矿床。

(3) 气晕找矿法:岩体或矿床周围矿物包裹体中含某种气体的浓度在趋向岩体或矿体的方向上有增高的趋势。一般以 $\text{CO}_2$ 为标志气体, $\text{H}_2$ 、Ar等气体也可作标志气体。某轴矿周围有明显的氦晕,从而确认包裹体氦晕也可作为找轴矿的新方法。

(4) 包裹体稳定同位素蒸发晕:据报道,包裹体中 $\text{H}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、C、S、Ar等元素的稳定同位素比值在矿体周围的变化也能反映截然不同的地质环境,并呈晕的形式作有规律的变化。

2. 利用铁帽、土壤、淋滤盖岩和沉积物中包裹体的特点评价矿化点。这类地质体中某些稳定矿物,

如石英、石榴石等未被风化,仍可保存与矿床有关的特征包裹体,如斑岩铜矿的高盐度包裹体、某些矿种中的含石油和含有机物的包裹体。采集这些样品,选取其中未风化的残存矿物,并用各种方法确定包裹体特征,从而推之风化产物的来源、原岩性状及成矿的可能性等。同样,研究冰碛地区的含矿砾石和河流卵石中的包裹体,也能帮助评定上游出露岩石和矿床的性质。

3. 岩体含矿性的评价。在一个区域内,常有大小、类型和含矿性各异的许多岩浆岩体,总结含矿和不含矿岩体矿物包裹体的特征,可作为岩体含矿性评价的标志。例如,“硅酸盐矿物+金属矿物+玻璃+流体”包裹体的出现,可作为含矿的标志。中酸性岩浆岩的矿物中出现“硅酸盐+硫酸盐+玻璃+流体”包裹体时,附近往往有高中温硫化物矿床产出。

第六届国际矿床成因讨论会上有关岩浆包裹体研究指出:含矿花岗岩和石英斑岩的成岩温度约为 $800^\circ\text{C}$ ,包裹体中含水、不含矿的同类岩石,成岩温度为 $1000\sim 1200^\circ\text{C}$ 。

我国地科院李阴清等对玉龙斑岩(钼)矿区含矿和非含矿的斑岩包裹体特征的研究,提出了区别该区含矿和不含矿斑岩的包裹体标志。这些标志在其他斑岩铜矿地区也可参考。

4. 预测隐伏矿化的包裹体准则。E. M. 拉兹科等(1980)总结了Au、Hg—Sb、Pb—Zn、萤石、水晶和稀有金属矿床的包裹体研究资料,提出预测隐伏矿化的六条准则:(1)在区域上,成矿溶液的温度、聚集状态和化学成分等参数沿垂向主要构造成矿带走向有规律的交替变化,明显表现出区域温压地球化学分带性(如东贝加尔成矿省)。

(2)在朝着同源侵入体的方向上,成矿溶液的温度、压力、气成活动和溶液浓度、二氧化碳等挥发组分的饱和度趋向增高,表现出局部温压地球化学的分带性。(3)大多数岩浆期后矿床矿化发育的古地热区,温度梯度相当稳定,水平变化为每100米 $1^\circ\text{C}$ 到 $5\sim 10^\circ\text{C}$ ,垂直变化 $10^\circ\text{C}$ 到 $20\sim 40^\circ\text{C}$ 。

(4)大多数情况下,矿物类型和主要金属矿物组合对形成的时间相当稳定,特别重要的是成矿作用的温度变化范围相当稳定,不受区域成矿专属性、地质构造、成矿深度、成矿体系类型、成矿溶液聚集状态和压力等因素影响。(5)当形成多种矿石建造的矿床时,各成矿阶段溶液的化学变化各有特

点,并有明显的演化方向。(6)成矿溶液在其发展演化过程中,大体经历了气成—热液、沸腾和热液等三种状态,具不同工业价值的矿石建造,其沉淀富集的时间和场所与成矿流体所处的状态有相当稳定的关系。

5.包裹体气相成分作为内生热液矿床侵蚀截面和剥蚀深度的标志。B. B. 列维茨基等(1981)综合研究了苏联贝加尔地区各种类型金矿田不同层位和地区的不同深度含矿体系的包裹体气相成分资料,以CO<sub>2</sub>含量、碳氢化合物和H:C:N:O原子比作为矿床侵蚀截面和剥蚀深度的标志(《地质地球化学》,1982,第2期)。

上述方法,有的仍处于试验阶段,用于找矿必须配合详细的地质研究及其他找矿方法,成果解释尤应谨慎。

### 三、包裹体数据用于解决区域地质和矿床地质问题

1.地质填图。利用温度梯度、岩体含矿性评价资料及某些矿种包裹体成分特点可解决区域范围内某些地质填图问题。如用爆裂法确定两组岩墙或岩脉的先后关系。

2.成矿年龄。耶尔马柯夫曾利用被许多不含矿的石英脉切割的构造复杂地区的矿物包裹体成分或温度的差异与几个世代石英的关系,澄清这些石英脉的年代问题。现在可以用钾氩法、铷锶法、钐钐法直接测定包裹体中的放射性同位素,解决成矿年龄问题。如T. J. Shepherd等人(1981)用铷锶等时线法测定某钨矿包裹体样品的年龄为 $392 \pm 5$ 百万年,与该热液脉中白云母的钾氩法平均年龄( $387 \pm 6$ 百万年)基本一致。目前国内尚未开展这些方法,国外有的方法仍在试验阶段。

3.地层对比和地质构造的研究。在找不到化石的地层中,用碎屑矿物包裹体特征进行对比,可以解决其相互关系和时代等问题;对某些变质岩区岩石中包裹体的排列方向和其他特点的研究,可以确定岩石的构造特征、追索断裂构造的发展方向和成矿构造的性质等。这几方面的应用尚不普遍,但遇到某些特殊地质问题(如找不到化石)时,包裹体研究就能发挥其独特的作用。

### 四、利用包裹体数据研究成岩成矿理论

#### 1.矿床成因和矿石沉淀环境的研究

(1)矿床的研究,如Ilmari等人(1982)对世界几十个锡矿的包裹体研究指出,伟晶岩锡矿均一温度约在 $360 \sim 370^{\circ}\text{C}$ ,爆裂温度 $370 \sim 520^{\circ}\text{C}$ ,矿

物中有多种含水的硅酸盐熔融包裹体;一些稀有元素伟晶岩矿物中含有不同盐度和不同温度的包裹体,有些锡石中有主要由于矿物组成的复杂包裹体。玻利维亚等地的锡石中常常可以找到沸腾包裹体;指出成矿压力一般为 $200 \sim 300$ 巴,但石英—锡石型矿床的成矿压力变化很大,约 $100 \sim 1800$ 巴。可见各种锡石矿床的成因和成矿环境是完全不同的。

洛德(1977)研究密西西比河谷型层状铅锌矿包裹体指出,该矿床有盐度高(一般比海水高得多),均一温度 $75 \sim 200^{\circ}\text{C}$ ,密度大,含有机质等特点,提出深部循环的原生热卤水(可能有某种岩浆成分)成矿的成因理论。

(2)不同矿床包裹体稳定同位素的研究,提出两点有普遍性的结果:①岩浆水上面有局部的地表水加入(通常为雨水,但黑矿类矿床为海水)。②所研究的多数矿床中,都有几种来源的水混合。Ilmari等人(1982)研究秘鲁及葡萄牙等地的钨—碱金属矿床包裹体稳定同位素资料、包裹体特征和矿物共生顺序,提出云英岩化和早期脉状钨矿化形成于沸腾的岩浆,高温高盐度热液中有大气水渗入,从而造成液体的温度和盐度下降。

(3)矿液沸腾和热梯度是多种矿床的成因标志。玻利维亚锡矿富矿带矿液都发生过沸腾;秘鲁科尔基的富银矿和金矿仅产在空间和时间上矿液发生过沸腾的地方;斑岩铜矿沸腾包裹体出现的地方常常是富矿体存在的场所;智利埃爾—萨尔瓦多,苏联科翁拉德,美国铜谷、宾汉,我国的江西富家坞、西藏玉龙斑岩铜矿都具有这种特点。由此可见,矿液沸腾与多种矿床的形成有内在的联系。

在垂直或水平方向上,温度递减或递增(热梯度),是矿石沉淀的重要原因。它可指出矿液流动方向和矿体可能的侧伏方向,从而指导找矿勘探工作的进行。史密斯等人研究了英格兰北部北彭奈恩Pb—Zn—Ba—CaF<sub>2</sub>矿脉中包裹体均一温度,指出该矿区横向的温度变化为每米 $0.4 \sim 0.2^{\circ}\text{C}$ ,垂向在500米深处为每米 $0.1^{\circ}\text{C}$ ,地表为每米 $0.5^{\circ}\text{C}$ 。洛德研究美国科罗拉多州詹姆斯登与出露的岩株有关的萤石和金矿床上没有包裹体热力分带和盐度分带,认为矿液是从深部一个大侵入体提供的,并认为在大面积范围内,横向均一温度均匀意味着热液有广阔来源。

2.成矿模式的研究。对典型矿床进行深入研究,查明成矿物质、成矿热液来源、成矿物理化学条件和规律性,建立成矿模式,从而指导找矿勘探,是

当前矿床研究的一个重要方面, 矿物包裹体能提供可靠的证据。

(1) 斑岩铜矿: 对世界许多大型斑岩铜矿包裹体研究资料的综合分析, 提出了这类矿床的普遍性模式: 核心部位包裹体具反复沸腾、高温度、高盐度、高密度的特点, 向边缘部分沸腾现象消失, 盐度、温度和密度降低, 呈环带状分布。

(2) 铅锌矿: 对密西西比河谷型矿床的研究, 提出了深层热卤水循环成矿模式; 冶金部地质研究所对我国凡口铅锌矿床包裹体的研究, 提出了深部岩浆水(或地下水)和浅部地下水混合的成矿模式。

(3) 对日本黑矿包裹体C, H, O稳定同位素及其它特点的研究, 提出了比较接近于实际的并为地质学家们接受的深海海水循环成矿模式。

3. 岩石学的研究。在国外, 包裹体数据用于解决岩石学问题进展的很快。首先, 1979年洛德发表了“岩浆包裹体成因意义”一文, 较全面地叙述了岩浆包裹体的成因、形成机理和主要类型, 并指出岩浆包裹体将为地质研究提供六方面的数据:

(1) 岩浆结晶期间, 晶体、液体和各不混溶相的特征数据; (2) 结晶温度和相晶出顺序数据; (3) 相对和绝对冷却速率数据(即岩浆的热历史); (4) 原始热液的成分数据; (5) 岩浆混合物组成数据; (6) 挥发组分的数量和特点及其在岩浆侵位时的演化。

其次, 岩浆岩的研究取得了许多有价值的新资料: (1) 提出了某些岩浆岩的含矿性判别标志;

(2) 提出了岩浆成矿系列的包裹体标志(见陈银汉《包裹体地球化学》); (3) 洛德等人(1967)对花岗岩石英中包裹体的研究, 指出硅酸盐熔体和浓的盐溶液之间的不混溶性。扎卡成科(1976)等人则指出, 某些囊状伟晶岩形成时, 从含水硅酸盐熔体到水溶液之间是连续演化的。因此, 洛德等人认为, 自然界从岩浆到热液连续演变和不混溶性都可以存在; (4) 大致确定了主要岩浆岩的形成温度范围: 酸性岩(花岗岩、石英二长岩)980~1140℃, 火山岩(石英角闪岩、熔岩、碎屑岩、凝灰熔岩)980~1350℃; 碱性岩(霞石正长岩)1040~1120℃; 玄武岩1120~1450℃; 碳酸岩约400~600℃……。

变质岩包裹体研究证明: 一般有大量CO<sub>2</sub>气体存在。水和CO<sub>2</sub>是一组不混溶体系。本文前已指出, 不同的变质岩, CO<sub>2</sub>含量有规律地变化。

沉积岩包裹体研究正在深入开展。目前已确认某些含有机物及碳氢化合物包裹体、纯水包裹体是沉积岩的特征包裹体。

由此可见, 岩石包裹体的研究是极为重要的。

4. 包裹体数据的热力学探讨。关于气体包裹体的热力学分析, 借助理想气体的热力学方程, 苏联学者和我国的季荣龙等人(1977)曾作过比较详细的讨论。但大多数热液矿床的包裹体定量分析数据需借助化学热力学解决pH、氧逸度、压力等问题。预计这方面的探索将是包裹体数据应用的一个潜在的发展方面。

### 包裹体研究方法的现状和进展

#### 一、包裹体研究方法的基本要求

根据贵阳地球化学所卢焕章博士介绍, 西方国家包裹体研究方法发展很快, 并提出了三个基本要求:

1. 仪器设备和方法标准化。标准化是现代科学技术和生产管理的要求, 为了便于数据利用和对比, 各种型号的热台、分析仪器和方法必须实现标准化。

2. 数学测量要求严格可靠。目前国内外发表了大量的包裹体测试数据, 有许多数据是不够严密的, 有些矿区几个单位测定的结果, 相差甚远, 造成人为的困难, 甚至动摇了某些人对包裹体数据的信心。因此洛德认为, 宁愿测一个准确可靠的数据, 也不要1000个不准确的数据。

3. 样品和数据要有代表性。

#### 二、显微镜研究方法。这是包裹体研究的基础,

可解决包裹体的相态、类型、不混溶特征、形成机理和定性、定量测定某些组分。它是必不可少的包裹体研究内容。近年来, 除了常规的测温测压外, 在研究方法上又有许多新的进展。

1. 显微电视法观测包裹体。采用显微镜和摄像系统与电视机结合, 观测包裹体有很多优点: (1) 放大倍数高, 若显微镜放大300倍, 电视机可放大500倍, 总放大率即可达15万倍。(2) 电视屏幕可供多人同时观察, 方便地看到包裹体全貌, 讨论问题极为方便。(3) 可记录到全部试验过程, 对解决某些实际地质问题提供了条件。(4) 便于教学, 学生可以同时看到图象和听到解说, 效果好。

2. 冷冻法可测定气液包裹体的盐度、初熔温度和某些气体成分。用这种方法测定的初熔温度可确定包裹体属于何种低共熔体系(见表); 测定冷冻温度可以确定包裹体的盐度; 在冷冻台上可辨别的气体成分有N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>O,

CH<sub>4</sub>, NO, CO, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, 乙烷、乙烯 H<sub>2</sub>S等。用冷冻台测定初熔温度后确定包裹体体系的方法是冷冻法研究包裹体的方法的重要发展。不过冷冻台不适于大多数小包裹体(小于10微米)和含量甚微的气体组分。

### 3. 压碎法测定包裹体气体成分。Ильгрова

包裹体溶液中某些盐类的低共熔共熔点温度表

体系	低共熔共熔点温度, °C
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - H <sub>2</sub> O	-1.2
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - H <sub>2</sub> O	-1.6
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> - H <sub>2</sub> O	-2.1
NaHCO <sub>3</sub> - H <sub>2</sub> O	-2.3
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> - NaHCO <sub>3</sub> - H <sub>2</sub> O	-3.3
KCl - H <sub>2</sub> O	-10.6
NaCl - H <sub>2</sub> O	-21.1
NaCl - Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> - H <sub>2</sub> O	-21.4
NaCl - Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - H <sub>2</sub> O	-21.5
NaCl - NaHCO <sub>3</sub> - H <sub>2</sub> O	-21.8
NaCl - KCl - H <sub>2</sub> O	-23.0
NaCl - MgCl <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O	-35.0
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> - H <sub>2</sub> O	-37.0
CaCl <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O	-50.0
NaCl - CaCl <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O	-55.0

(1968) 曾用不同吸附剂吸附气体的方法, 在显微压碎台上分别测定包裹体中的 H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, HF, HCl, CO<sub>2</sub>, NO, O<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 和某些重碳氢化合物。利用赖斯勒反应还可发现气相中的 NH<sub>3</sub>。该法的装置和具体操作方法已有专文介绍, 它需要较大的包裹体才能开展工作。

4. 高温高压热台的研制。法国正在研制一种高温高压热台, 可加热至1400°C, 加压至7000巴, 对包裹体的测定将大有帮助。

### 三、成分分析方法

1. 群体包裹体成分分析方法: 一般可分为打开一提取方法和测定方法两部分。

(1) 打开和提取包裹体的方法: 主要有真空压碎法、真空磨碎法和加热爆破法。大多数学者认为, 爆破法最简单有效, 因此被广泛采用。中南矿冶学院中心实验室何录卿等采用的真空磨碎法比较简单, 效果也较好, 易于控制, 可解决爆破法不能解决的某些困难, 是值得推广的一种方法。阴、阳离子的提取方法一般采用纯水定量浸取法。

(2) 测定方法:

①水测定。测水常见有两种方法。一是气相色谱测水。此法只能测微量水, 因为包裹体样品中水

一般是毫克级的, 故采用此法的单位极少。二是重量法测水。该法一般用载气或真空驱动, 吸收剂吸收称重。对毫克级的水测定比较准确, 装置简单, 国内多采用此法。

②气体测定。色谱法和气体质谱法是常用的方法。前者可同时分析多个元素, 灵敏度高, 操作简便, 速度快, 为多数单位所采用。其检测下限一般可达10<sup>-8</sup>克以下, 已测定的包裹体中成分有 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, He, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S和多种烷、烃类化合物, 如 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>等。我国国内一般只能测前七种成分。

质谱法所测项目与色谱相同, 但采用者较少。

色谱一同位素质谱联用仪连续测定包裹体气相成分和 H, O, C 稳定同位素组成是一种有效而简便的新方法, 是很有发展前途的方法之一。但是由于设备复杂、价格贵, 做包裹体还需改装进样器, 因此尚未普遍使用。

③阳离子测定。一般用原子吸收光谱法测定 Li, Na, K, Ca, Mg 等元素, 检测下限达 ppb 级, 可满足主要元素的测量。但该方法对某些金属元素灵敏度不够高, 为此引入了光量计和中子活化分析, 可解决绝大部分元素测量。后者灵敏度可达 10<sup>-15</sup> ~ 10<sup>-11</sup> 克, 但要求有反应堆辐射装置, 故不易推广。

④阴离子测定。一般 F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> 用离子选择电极法可满足测定要求, 其灵敏度可达 10<sup>-6</sup> ~ 10<sup>-7</sup> M。有人认为用硫氰酸汞法测 Cl<sup>-</sup> 更有效。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的测定方法有比色法、重量法等, 灵敏度一般不太高。CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 常用滴定法, BO<sub>3</sub><sup>3-</sup>, HS<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 等均需另择方法, 因此阴离子测定是包裹体成分中最复杂的。但最近引入离子色谱可同时测定 F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 等, 并可测定 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 及某些阳离子 (如 K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>), 方法简便、效率高、灵敏度也很高 (可达 ppb 级)。因此, 可以认为离子色谱仪测定包裹体中的阴离子是最理想的仪器, 也是最新引进包裹体测定的有效方法。

### 2. 单个包裹体分析方法

(1) 激光拉曼光谱法: 以显微镜和激光拉曼光谱联合组成的 Mole 探针等设备, 是单个包裹体分析的最新仪器, 其探测极限为: 气相 (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S 等) 10<sup>-2</sup> 克分子/升; 液相 (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) 2 × 10<sup>-16</sup> 克分子; 其他组分如 δC<sup>13</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, UO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 等也很高。固相 (石英、

方解石、赤铁矿、 $\text{NaHCO}_3$ 、石膏、硬石膏、钙芒硝、冰、盐类水合物)  $10^{-11} \text{ cm}^3$ 。Rosasco等(1975、1976)用Mole探针测定了包裹体中的萤石、石英、磷灰石等组分,并指出该仪器的可用性和局限性。

据了解,法国已研制了更好的激光探针,具有更高的分辨力和分析速度。我国核工业部三所购置了一台Mole探针,为我国开展单个包裹体分析创造了条件。

(2) 红外光谱法: Calas和Hus(1976)用红外光谱研究了卤化物(主要是萤石)中的 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、碳氢化合物、 $\text{OH}$ 、 $\text{COOH}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NH}_4$ 和 $\text{NHCl}_4$ 晶体等。此法灵敏度高,但许多吸收红外光的矿物不能测定。

(3) 电子探针法:可测包裹体固相成分,优点是分析的元素多(从B→U)、用样少,缺点是光片磨制难度大。我国有较多的电子探针可用作包裹体分析。

(4) 离子探针和核子探针法:这两种仪器的优点是测定的元素多(可测周期表中的大多数元素),穿透矿物的能力较强,前者灵敏度可达1 ppm,后者可测原子序数小于12的元素及氦同位素,灵敏度较高。缺点是价格贵,难推广。

(5) 扫描电镜法:用于测定包裹体中的固相,但打开后固相成分容易丢失。

#### 四、包裹体稳定同位素测定

离子电针可作一些元素的同位素比值测定,但设备昂贵,测定条件高。一般仅收集包裹体中含量最多的氢、氧、碳样品,有些国家(如苏联、法国等)也建立了收集硫同位素样品的实验室。有关包

裹体年龄的同位素测定方法,尚正在进行试验,发表的数据极少。

概括起来,包裹体研究方法在各方面都有很大的进展。单个包裹体分析是一个最重要的发展方向;显微电视法为研究包裹体提供了一种值得推广的新手段,同位素分析和岩浆包裹体观测也取得了重要进展。群体包裹体分析中引进了离子色谱是一个极重要的进步,各种方法都在不断改进。但应指出的是,各种方法都有其优点和局限性。如用离子探针可以直接分析包裹体成分和同位素组成,但它只适用于部分元素,而且设备昂贵,操作和维修比较困难。因此,即使有这类高级仪器也不能完全丢弃老的方法。

#### 结束语

地质学要求矿物包裹体的研究方法向高精度、高灵敏度和单个包裹体分析方面发展,大量有效的包裹体测试数据(包括同位素及岩浆包裹体研究的新资料),使得包裹体研究进入了一个新阶段。在找矿勘探方面发展了越来越多的方法和手段;在区域地质、成岩成矿理论方面,逐步深入到岩浆和热液的内在联系、地壳深部物质状态等比较深刻的地质问题的研究。可见矿物包裹体研究不仅是地球化学的范畴,它涉及到矿物学、岩石学、结晶学、矿床学、找矿勘探地质学等几乎所有的地质领域。因此,可称其为“包裹体地质学”,它在地质学中有广泛的发展前景。

在编写过程中,参阅了曾驥良、叶欣等同志提供的综合资料;引用了卢煥章博士在桂林讲学的内容,并曾请我所包裹体组有关同志提出修改意见,在此深表感谢。

#### 新 书 预 告

中国地质学会勘查地球化学专业委员会编辑的第二届全国勘查地球化学学术讨论会论文选编和第一次全国测汞经验交流会论文摘编已由秦皇岛冶金地质进修学院印刷出版。

《选编》介绍某些矿床的成矿—成晕地球化学模式;典型矿床的地球化学异常特征;特殊景观区地球化学找矿方法试验研究;化探数据处理及成图试验研究等。全书48万字,160幅插图,90个附表,280页。《摘编》共分六章。内容包括:汞气测量发展现状;汞气测量仪器的原理、结构和性能;野外工作方法;影响汞量测量的因素;找矿实例;汞异常形成的地球化学问题等。全书25万字,80幅插图,约180页。

两册书核收工本费伍元壹角。单位或个人需购者,径向河北省北戴河冶金地质进修学院财务科函索征订单。