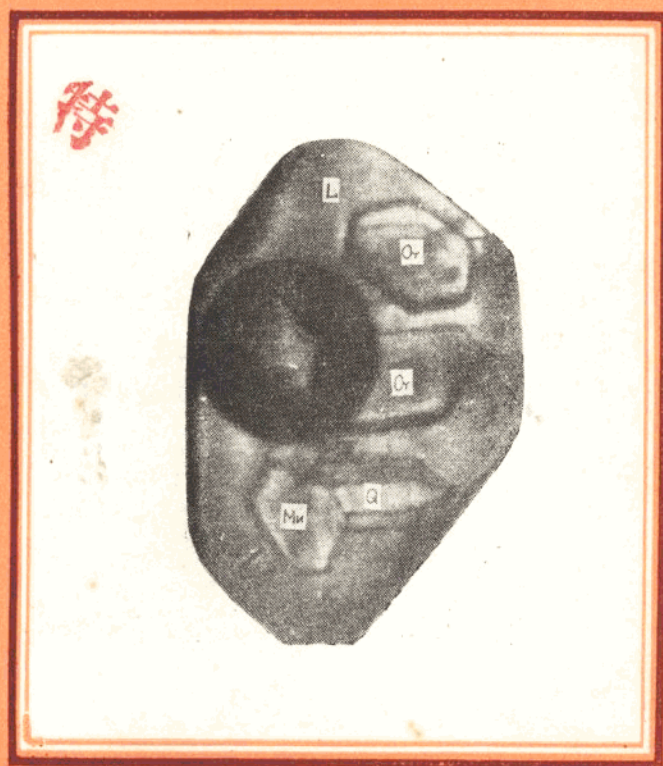


矿物包裹体 地球化学

陈银汉编著



河北地质学院

PDG

写 在 前 面

矿物包裹体地球化学是近年来逐渐发展建立的边缘学科，随着研究工作的深入，应用范围逐渐扩大。为了适应新形势的需要，吾院受地质部科学技术局和地质学会矿床专业委员会委托，开办了“矿物包裹体地球化学”培训班，编写了矿物中包裹体地球化学讲义。

由于时间紧迫（只有三个月的时间），笔者水平所限，实在难于胜任。但为了满足培训班的需要，只好在讲稿的基础上进行粗略整理。整理过程，地质系邵克忠主任、地质部科技局陶惠亮和矿床专业委员陈毓川等同志多次给予鼓励和帮助，讲义的付印和校对全由参加培训班的同志（陆慕孙、燕永恒、徐惠清、于海生、刘全喜、郑海飞和王合印等）共同完成，讲义中的部分图件由万朝珍同志帮助清绘。借此表示亲切的感谢。

文中错误和缺点请读者批评指正。

编 者

1981.10

目 录

第一章 绪言.....	(1)
§ 1 矿物中包裹体概念.....	(1)
§ 2 包裹体地球化学发展简史.....	(3)
§ 3 包裹体地球化学.....	(6)
一、包裹体地球化学概念.....	(6)
二、研究内容及方法.....	(6)
三、与其他学科的关系.....	(8)
四、今后研究方向.....	(9)
第二章 显微镜下研究包裹体及测相.....	(11)
§ 1 包裹体的识别及研究对象确定.....	(11)
§ 2 包裹体特征.....	(12)
§ 3 包裹体测相基础.....	(14)
一、“相”概念.....	(14)
二、单组分体系.....	(15)
三、相变时的 T—P 关系.....	(15)
四、水和二氧化碳的 TVP 关系及 CO_2 — NaCl — H_2O 体系分析.....	(16)
§ 4 测相.....	(22)
一、“相”组成.....	(22)
二、“相”的鉴别.....	(23)
三、子矿物鉴定.....	(24)
四、流体中相组成的鉴别.....	(24)
五、相体积测定.....	(32)
第三章 包裹体地球化学类型.....	(34)
§ 1 包裹体分类.....	(34)
一、成因分类.....	(34)
二、物理状态分类.....	(35)
三、成分——状态分类.....	(35)
四、包裹体地球化学分类.....	(36)
§ 2 岩浆包裹体.....	(38)
一、晶质包裹体.....	(38)
二、固化熔体结晶包裹体.....	(38)
三、固化熔体包裹体.....	(44)

§ 3 流体包裹体	(44)
一、气体包裹体	(45)
二、气液包裹体	(45)
三、含液相 CO_2 或 H_2S 多相包裹体	(46)
四、含子矿物多相包裹体	(46)
五、含有机物的包裹体	(48)
六、液体包裹体	(51)
§ 4 沸腾包裹体群	(51)
一、沸腾包裹体特征	(52)
二、沸腾、减压沸腾及意义	(53)
第四章 包裹体形成机理	(55)
§ 1 矿物生长介质	(55)
一、熔体及其性质	(55)
二、流体及其性质	(56)
三、硅酸盐 (B) —— H_2O 体系分析	(61)
§ 2 晶体缺陷与原生包裹体形成机理	(64)
一、晶体生长过程	(64)
二、晶体缺陷及原生包裹体形成	(65)
§ 3 包裹体相态变化分析	(68)
一、岩浆包裹体捕获相态及变化	(68)
二、原生流体包裹体捕获相态及变化	(74)
三、石盐中液体包裹体演化及意义	(80)
第五章 温度、压力测定方法	(81)
§ 1 备样	(81)
§ 2 均一法	(82)
一、发展简况	(82)
二、基本原理	(82)
三、主要仪器及结构	(83)
四、实验步骤	(86)
五、均一法数据处理	(92)
六、均一法评述	(98)
§ 3 爆裂法及淬火法	(98)
一、爆裂法	(98)
二、淬火法	(103)
§ 4 压力查定	(105)
一、等值线法	(106)
二、二氧化碳浓度法	(107)
三、克分子分数法	(109)

四、流体包裹体联合查定法	(111)
五、包裹体测压法评述	(113)
六、地质——矿物学方法	(113)
第六章 包裹体成分研究方法	(125)
§ 1 低温测量(冷冻)法	(125)
一、基本原理	(125)
二、冷冻装置	(126)
三、冷台校正及检查	(127)
四、实验方法及步骤	(128)
五、不同盐水体系的冰冻标志	(129)
六、包裹体中低沸点气体凝聚和查定	(131)
七、低温测量法的意义	(132)
§ 2 研究包裹体成分的物理法	(133)
一、激光拉曼光谱法	(133)
二、扫描电子显微镜分析法	(134)
三、电子探针	(135)
四、激光显微光谱	(136)
五、发射光谱分析法	(138)
六、其他分析方法	(138)
§ 3 单个包裹体成分分析法	(138)
一、实验仪器	(139)
二、简单原理	(139)
三、实验步骤	(139)
§ 4 气相色谱法	(141)
一、仪器装置	(142)
二、选择分离气体的最佳条件	(143)
三、打开包裹体最佳条件试验	(145)
四、实验步骤	(148)
§ 5 包裹体成分研究及 pH、Eh 值计算	(155)
一、打开包裹体的方法	(155)
二、不同条件下打开包裹体鉴定液相的可能误差	(161)
三、包裹体打开——提取方法	(167)
四、包裹体溶液化学成分分析	(171)
五、包裹体同位素测定	(175)
六、根据包裹体成分分析数据计算 pH 和 Eh	(176)
第七章 内生包裹体研究及内生成矿作用有关问题	(181)
§ 1 岩浆包裹体研究	(181)
一、岩浆包裹体信息及岩浆矿物结晶作用条件	(181)

二、岩浆包裹体均一化途径.....	(190)
§ 2 岩浆——成矿系列.....	(197)
一、岩浆——成矿系列的包裹体标志.....	(197)
二、岩浆——成矿系列讨论.....	(199)
§ 3 成矿作用热力学条件.....	(211)
一、温度和压力对成矿流体性质的影响.....	(211)
二、某些金属及其化合物迁移形式及溶解度.....	(213)
§ 4 某些矿床形成的热压地球化学条件.....	(218)
一、金及金银矿床.....	(218)
二、锡矿床.....	(226)
三、钨矿床.....	(231)
四、铜锌钼矿床.....	(236)
§ 5 成矿过程某些元素的作用.....	(238)
一、形成阴离子的元素.....	(239)
二、H—O—C体系气体平衡近似计算.....	(241)
三、硷金属和硷土金属.....	(246)
第八章 应用及实例.....	(247)
§ 1 宇宙、冲击岩包裹体研究及意义.....	(247)
§ 2 岩浆包裹体研究实例.....	(254)
一、火山喷发位置的确定.....	(254)
二、岩浆岩体研究实例(超基性——碱性岩及碳酸盐岩成因问题)	(256)
三、研究花岗岩结晶作用温度实例.....	(260)
§ 3 成矿作用有关问题实例.....	(261)
一、伟晶岩矿物中包裹体研究实例.....	(261)
二、利用包裹体研究斑岩矿床成矿作用的实例.....	(265)
三、利用包裹体同位素研究金矿成矿作用的实例.....	(271)
§ 4 地球化学探矿及实例.....	(272)
一、包裹体地球化学探矿的主要参数.....	(273)
二、包裹体地球化学探矿方法.....	(277)
三、应用实例.....	(279)
附：图版 I——XXXV.....	(285)
主要参考文献.....	(321)

第一章 绪 言

地学是六大基础学科之一。传统的地学研究是对自然现象的观察和定性的描述。本世纪以来,利用化学基础理论研究自然现象取得了一定的成效。五十年代至今,模拟天然矿物、岩石和矿床形成过程的实验研究也得到蓬勃发展。实验研究不仅对天然矿物、岩石和矿床形成过程进行了定量测定,同时对其形成机理的认识进一步深化。如果说在实验室条件下利用高压釜进行模拟实验是天然地质作用的再造,那么矿物中的显微包裹体就是成千上万的天然“小高压釜”。相比之下,研究天然小高压釜是当今热动力地球化学的主要对象。

§ 1 矿物中包裹体概念

矿物中包裹体是矿物生长过程(或生成之后)捕获(或沿裂隙浸入)的成矿介质(流体或熔体)或早期形成的固相,它被圈闭在晶体缺陷、窝穴(或愈合的裂隙)中,并与主矿物有相介线的物质称为矿物中包裹体。无论是天然矿物,或者是人造矿物都普遍含有包裹体。矿物生长过程捕获的成矿流体(或熔体)称为原生(或同生)包裹体。矿物形成之后在外动力作用下,主矿物产生裂隙,沿裂隙后来的流体浸入,随后裂隙逐渐愈合而形成的包裹体谓之次生(或后生)包裹体。有时在矿物生长过程,由于生长环境不稳定使晶体发生破裂,在矿物内部环带中的包裹体沿裂隙浸出,同时因晶体继续生长使浸出的包裹体物质被圈闭在晶体内部的裂隙中。这种包裹体具有次生包裹体的特点,但形成时间属同生包裹体,所以称为假次生包裹体(图一1),假次生包裹体是发生位移的原生包裹体,由它所传送的信息仍然是主矿物生长条件的反映。不管是原生包裹体、假次生包裹体或者是次生包裹体,在后期流体(或熔体)侵入或其他热动力的影响下都有可能使包裹体的特征和热性质发生改变。这种包裹体往往具有原来捕获时和新条件下的两重性,故谓之继生(改造)包裹体。继生包裹体是角砾或捕虏体中最常见的包裹体类型。

捕获包裹体的矿物称为主矿物(或主晶)。包裹体被圈闭后,由于温度和压力下降使溶液(过饱和)或熔体结晶作用,从中结晶出的矿物称为子矿物(或子晶)。

包裹体形成后是一个相对封闭的物理化学体系,所以是赋存于矿物中的天然高压釜。实验室里利用高压釜进行模拟实验,只能对实验结果进行分析,而不能观察其动态。然而,研究透明矿物中的包裹体,不仅能在显微镜下进行测相,同时可以直接观察热条件下子矿物生长过程的动态。在包裹体研究中通常假设:

1. “包裹体被圈闭的瞬间为均匀的单一相,并且被捕获的物质充满整个体腔。室温下所看到的不同相态是捕获之后体积收缩的结果”。但在某些不均匀体系中可以同时捕获不同的相态。不同相态可以在一个包裹体中共存,也可以在共生包裹体群中以不同类型的包裹体出现。前者不能用于测定矿物生成温度。但是,这种包裹体能用于了解矿物

生长环境的物理化学状态。例如气体和液体, H_2O 和 CO_2 等等, 它们彼此之间的不混溶受一定温度和压力所控制。捕获不均匀体系中的不同熔体在自然界同样存在。不同相态出现实质上是熔体演化到某一特定阶段的产物。因此, 利用不均匀熔体相的包裹体结合高温高压相图分析是查明地质过程岩浆熔体演化不同阶段相态组合特征的重要根据。

包裹体群中当不同类型的包裹体密切共生时, 彼此之间均一化温度差别较大(最高温度到最低温差甚至超过 $200^\circ C$)。这种包裹体形成时, 往往是由均匀状态向不均匀状态转化的瞬间。瞬间捕获的气液包裹体是多种类型包裹体群中分布最广, 数量最多的包裹体, 是瞬间稳定态的代表。所以, 利用气液包裹体的均一化温度同样可以反映捕获瞬间矿物的生长温度。

2. “包裹体圈闭后内部的体积不变或变化不大”, 实际上包裹体的体积并非绝对不变。例如绿柱石中的包裹体, 在体腔壁上或气泡边缘有六方柱状的小绿柱石晶体和晶簇堆积(照片版 I)。根据包裹体液相成分分析结果, 说明液相中富含 Be。显然, 包裹体中的绿柱石是主矿物在生长过程中捕获富 Be 的铝硅酸盐水溶液随温度下降后的盐析物。然而, 由于绝大多数被包裹的物质与主矿物的成分不完全相同, 这种成分上的差异表现在热动力过程中热胀和冷缩系数也不同。两者的热胀、数冷缩系数差便使包裹体体腔发生变化。例如在火山岩和次火山岩中见到的两种玻璃包裹体: 一则为负晶形, 其表面光滑, 气泡(或气孔)位于包裹体边缘。另一种呈近浑圆形, 表面龟裂(或皱纹)发育, 包裹体边缘常有气体包裹体分布(照片图版 I)。前者均一化温度较低, 后者较高(两者温差一般为 $100^\circ C$ 左右)。前一种包裹的熔体冷缩系数(含挥发分少)小于主矿物的冷缩系数; 所以包裹体体腔内出现的虚脱空间小, 气体分压不大(小于或等于主矿物抗压强度), 因此气泡在边缘的虚脱空间集中。后一种包裹的熔体冷缩系数(含挥发分多)大于主矿物的冷缩系数, 在冷凝过程中体腔内的流体大量集中, 气体分压大于主矿物抗压强度, 这时包裹体破裂, 流体逸散。于是形成了龟裂(皱纹)包裹体及其周围的流体包裹体群。包裹体中挥发组分逸散的结果使均一化温度升高。如果用这种包裹体来测量矿物的生成温度, 便出现温度偏高的现象。除了龟裂、去气明显的包裹体外, 无论是流体包裹体, 或者是玻璃包裹体在重新加热时上述因素引起的体积变化一般能得到纠正。如绿柱石中的包裹体随子矿物溶解后体腔略为扩大。在火山岩或斑岩的斑晶中以负晶形出现的玻璃包裹体均一化后也发生体腔扩大。事实说明, 包裹体圈闭之后虽然体腔稍有变化, 但影响不大, 可以忽略不计。

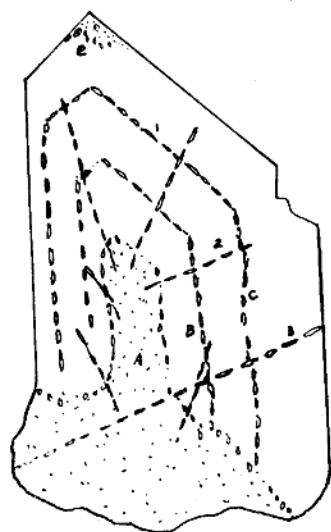


图 1 烟水晶包裹体

1. 原生包裹体 2. 一假次生包裹体
3. 一次生包裹体

A—晶核及根部 B、内部包裹体环带
C—外部包裹体环带 e—锥顶包裹体。

3. 假设包裹体圈闭后没有外来物质加入和包裹物的遗漏。实验证明大多数情况下逸漏和浸入并不发生。但在次生包裹体发育的矿物中常有外来物质加入使原生包裹体受到不同程度的改造（继承包裹体）。详细研究和区分原生和次生包裹体可以比较准确的确定继承包裹体。火山岩、浅成和超浅成岩的斑晶中常见到包裹体去气化作用，这种包裹体使均一化温度升高，所以其他物理化学参数也发生相应的变化。虽然它不能用来研究主矿物生成时的物理化学条件，但对了解岩浆熔体与流体之间的关系提供了直观证据。事实上，包裹体物质既有渗入，又有逸出，但这种现象很少，且多数情况下能够辨认。这样，除了有物质渗入和逸出的包裹体外，绝大多数仍然是相对封闭的地球化学体系。

§ 2 包裹体地球化学发展简史

包裹体地球化学是本世纪七十年代逐渐发展和建立起来的新学科。虽然是年轻学科，但历史悠久。回顾发展历史，大约经历四个阶段：

一、萌芽阶段（三世纪至1858年）：我国著名的药物学家明代李时珍在《本草纲目》中曾记载：“魏吴普曰（三世纪）：生太山，上有甲，甲中有白，白中有黄，如鸡子黄色”。北宋著名的自然科学家沈括，在《梦溪笔谈》里曾对水晶中的包裹体记述如下：“……大如鸡卵，微绀色，莹彻如水。手持之映空而观，则末底一点凝翠，其上色渐浅；若回转，则翠处常在下。不知何物，或谓之《滴翠珠》”。李时珍在《本草纲目》中所附的“禹余粮”和“空青”图，前者是含子矿物的多相包裹体，后者为液泡。可见，我们的祖先很早就对包裹体有了初浅的认识。然而对包裹体认识的科学化却始于中世纪，毕仑尼（972—1048年）在他的著作中曾写道：“矿物中有气相和液相包裹体，……包裹物、地球之《汁》，矿物形成于其中。矿物是这些液相硬化而成”。简单的描述说明了毕仑尼对包裹体认识相当深刻，他不但看到矿物中存在包裹体，而且从成因上说明它是地球的分离物，是矿物生长的“母液”。

在漫长的奴隶社会和封建社会里，自然科学的发展受到很大的限制。直到十九世纪初对包裹体才有了进一步认识。1822年索尔比（Sorby, H.C）在石英和水晶中发现含水、水溶液和硫化物痕迹的包裹体。随后发现黄玉、金绿宝石中有类似的包裹体。包裹体中除水溶液外，并有碳酸盐溶液（膨胀系数很大）等。戴维（Davy, H. 1822, Nicl. W和Davy, H. 1828年）曾指出：“在高压下萤石和重晶石中的液体包体中出现气相”，戴维首次提出包裹体中相态与温度压力有关。1836年弗兰金海姆（Frankenniem）在研究萤石、石膏和云母时发现包裹体分布与结晶习性有关。因此，包裹体研究开始由萌芽转入测温工作阶段。

二、测温阶段（1858—1949年）：十九世纪五十年代以前，从发现矿物中包裹体到索尔比（1858）测出第一个均一化温度，包裹体的研究工作只停留在定性描述阶段。在索尔比利用简单的方法发现水晶中的气液包裹体当加热到一定温度时，气—液两相均一。由此他认为气液包裹体在捕获时为均一相，气液两相是母液冷凝的结果。1884年朱林（Julien A. A）描述了显微加热台，为包裹体测温工作奠定了基础。此后很多学者不仅注意对包裹体进行定性的相态描述，同时开始测定不同矿物的形成温度以及估算其形成压力。1914年林格伦（Lindgren W）和怀特海德（Whitehead W）研究墨西哥某矿

床中石英晶体时发现,包裹体中除气、液相外,还有石盐存在。他们用测相的方法计算出NaCl的浓度为57.5%。并且提出只有在温度为500—525°C时才能存在浓度大的饱和盐溶液。由此推测石英形成温度为500°C。1921年纳肯(Nakken, P)以物理化学为基础系统地研究了压力和温度的关系时得出:当压力影响太大时,不能利用含CO₂的包裹体来测定形成温度。1925年赫登(Holden, H)在查明包裹体中温压关系的同时测定了体系内碳酸的密度,首次用包裹体成分来阐述烟水晶和紫水晶染色的原因。十九世纪中叶到二十世纪初,虽然很多学者从不同的角度对流体包裹体的T—P关系进行了阐述,测定了一定数量的矿物形成温度;开始估算矿物形成压力,并对包裹体溶液的成分进行了定性描述及半定量测算,甚至从矿物结晶习性开始探讨包裹体的形成机理。然而,包裹体研究工作并没有得到应有的重视。1933年美国地质学家纽豪斯(Newhuns W. H)对水成派和火成派长期争论不休的密西西比铅锌矿中的闪锌矿进行了测温。测定结果闪锌矿的形成温度为115°C到130°C,是典型的低温热液矿床。纽豪斯的研究结果发表后,引起地质界很大震动。利用包裹体研究解决矿床成因中的争论问题收到一定的效果。随着包裹体测温工作的发展,英格松(Ingerson, E)1947年根据高温高压实验结果从理论上对包裹体溶液的T—P—V关系进行了阐述。他在专著中指出:包裹体充填度与气相消失温度呈函数关系(纯水到含盐10%的溶液);压力对温度有一定影响,其范围达90°C。在总结当时实验研究资料的基础上,制定了水的P—T—V关系图。图解表明,包裹体的充填度、温度与压力有关。如果根据地质资料求出压力,那么用压力在图中就可以查出矿物的形成温度。此外,在压力对形成温度的影响上还提出了压力校正问题。

包裹体测温中,温度数据的差异除了压力影响外,还要区分不同类型的包裹体,这是保证测温工作正确与否的前提。列姆列英(Леммлейн Г. Г 1929年)首先提出包裹体的成因标志,并按成因不同分为:原生和次生包裹体两类。原生包裹体又分同生和后生两种。在此基础上戈利高里耶夫(Григорьев Д. П 1948)对成因分类进行了补充并提出原生和次生包裹体的鉴别标志。原生包裹体的形态受矿物的生长控制,次生包裹体形态和分布与愈合的裂隙有关。

加拿大多伦多大学斯科特和施密斯(Scott, H. S and Smith, F. G. 1948)制造的第一台爆裂测温仪问世后,为不透明矿物中包裹体测温找到了新途径。与此同时施密斯对前人已发表的400多篇有关包裹体研究的论文进行了总结,提出包裹体研究的方向。

三、成矿溶液研究阶段(1950—1976年):耶尔马可夫(Ермаков, Н. П 1950)的“成矿溶液研究”一书问世后,为包裹体研究进入新阶段奠定了基础。他在专著中明确指出“矿物包裹体是天然成矿溶液的样品”。为了进一步研究成矿溶液,美国肯尼迪(Kennidy G. C 1950)等以物理化学为基础对包裹体溶液的PTV关系进行了论述。洛德(E. Roedder 1953)在包裹体成分研究方面作出了有益的贡献,用冷冻法研究成分的论文发表之后,又对显微冷冻台的装置及其技术进行了全面的阐述。同时利用均一法、冷冻法及化学分析法研究流体包裹体的成分。洛德在“热液矿床地球化学”及“气液包裹体成分”两部专著中对流体包裹体成分研究进行了总结,根据包裹体资料比较系统地阐述了热液成矿作用的机理。

1960年二十一届国际地质学会正式成立“成矿溶液包裹体委员会”(Commission

on ore Forming Fluids in inclusion 简称COFFI)。随后在1963(布拉格)、1969(瑞士)和1971召开了三次学术会议,会议期间宣读了80多篇论文。在大会总结中向全体会员国提出今后包裹体的研究方向。

1965年希塔诺夫(Хитапов В.Д.Н)总结了从伟晶岩到低温热液矿床中流体包裹体的成分。七十年代初,随着新技术、新方法的引进,使包裹体研究出现了新的面貌。六十年代包裹体研究的重点是流体包裹体及在成矿作用中的意义。所能测定的温度范围大多数小于 1000°C 。成分研究停留在矿物中全部包裹体成分分析。包裹体所提供的物理化学参数除温度、压力、成分和酸碱度外,其他数据很少。

七十年代初,包裹体研究的特点是测温的范围扩大(最高达 1750°C),压力计算方法增多。在成分研究上由矿物中全包裹体分析逐渐发展为单个包裹体成分分析。并在单个包裹体成分分析技术上由打开展到不打开(用物理法)包裹体进行定量(或半定量)测定。所测定的成分除液相外,还开展了大量的气相成分分析,从而使研究的元素种类逐渐增多。另外,随着热台的改进把岩石和矿石中的包裹体研究统一起来,使包裹体的研究成果开始用于指导寻找盲矿体。

四、包裹体(热动力)地球化学阶段(1976年以后):七十年代末矿物中包裹体研究的主要成绩是成分研究的迅速发展以及在原有工作的基础上把热力学理论应用到包裹体研究中去。如果说流体包裹体是天然成矿溶液的样品,那么熔体包裹体便是天然的岩浆。研究相对封闭的岩浆和成矿流体体系就是实验地球化学的主要对象。

现在不仅能直接测定流体(熔融)包裹体的均一温度、压力,包裹体的体积、成分(气、液和固相)等;而且,随着同位素分析技术的提高已经开始对包裹体中C、H、O、S等同位素组成的研究。根据包裹体成分分析数据计算溶液的酸碱度和氧化还原电位等参数。

测相工作是近年来包裹体研究中的重大进展。根据包裹体的相态转变与热动力过程的关系来查明岩浆——成矿作用的演化机理。进而了解成岩成矿元素的地球化学行为。

总之,矿物中包裹体是天然成矿流体(或熔体)的样品。研究包裹体除了对成岩成矿过程的物理化学动态进行定量外,还能比较直观地了解成岩成矿组分在不同物理化学条件下的行为,查明元素迁移富集的规律,用来指导生产实践。因此它是天然的地球化学体系。

五、我国包裹体研究简况:我们的祖先虽然很早以前就对包裹体有一定的认识,但国内真正开展包裹体研究较晚。六〇年先后在地质部、中国科学院和冶金部的个别单位开始对水晶中的包裹体进行测温,但十五年来发展很慢。1977年在广西全州召开全国第一次成岩、成矿实验及包裹体研究学术经验交流会。参加单位一百多个,到会代表二百余人。会议宣读了近90篇论文,在交流经验的基础上,认真分析了国内外现状,与会代表一致认为:国际上包裹体研究工作发展很快,相比之下国内无论是技术水平或是工作程度都有相当大的距离。因此,为了促进我国科学技术的发展,应该加紧步伐迎头赶上。这次会议是我国全面开展包裹体研究的一次动员会。

短短的四年来,国内包裹体研究工作迅猛发展,在岩石、矿物和矿床学术经验交流

会上都有大量包裹体方面的研究成果，全国第一部包裹体论文集已正式出版。地质学会矿床专业委员会和岩矿地球化学学会分别设立了包裹体专业组和专业委员会。地质部属院校已正式开设包裹体地球化学课程。仅仅四年时间，参加包裹体研究的单位由原来十多个发展到八十多个，人数由原来三十人左右发展到二百多人。研究的内容：从包裹体形成机理、温压参数测定、成分及同位素分析到热动力计算。研究对象既有岩浆岩、变质岩，又有内生矿床及外生矿床等。目前，我国包裹体研究工作已经跨越了测温阶段逐渐进入了地球化学的研究阶段。

§ 3 包裹体地球化学

一、包裹体地球化学概念

包裹体地球化学：是以成岩成矿过程不同阶段生成的矿物（不同世代）中包裹体为研究对象；系统分析不同包裹体的物质成分（矿物成分、化学成分及同位素组成）、相态，测定各种组分和相态变化时的热力学参数，进行热动力“测相”。查明成岩、成矿物质来源及不同组分在热动力过程行为的一门边缘学科。因此是地质学的分支。

包裹体地球化学的研究对象是包裹体，它是一种相对封闭的物理化学体系；体系的演化取决于其中的物质组成及条件的变化。室温下包裹体中的相态是捕获成矿溶液（或熔体）演化的结果。如果企图恢复成矿溶液（或熔体）的原始状态，必需恢复由原始状态到常温状态时相应的平衡条件。这一过程，可以用实验的方法来仿效和记录成岩成矿过程中体系平衡时的热动力信息。

包裹体的热动力学信息有温度、压力、成分（包括不同相态的成分）；不同温度和压力下的成分变化；流体的酸碱度、逸度、活度、盐度和密度；相变时的氧化还原电位及自由能等。分析流体中S、O、H、C等稳定同位素，并测定放射性同位素。在熔体中按照不同相态的混溶速率计算粘度。

包裹体地球化学的目的是利用成因上有联系的包裹体所传送的信息，来阐明成岩、成矿过程有用组分分布、分配和迁移、富集的规律，并利用这些规律来指导生产实践。因此，我们不能把包裹体研究只看成是一种单纯的测温方法。

二、研究内容及方法

1. 地质调查：实验地质和野外地质一体化是发展微观地质学的前提。

野外地质调查过程，首先要阅读前人工作成果，穿越较大区域地质路线，建立起研究客体在区域地质——构造中的位置。对研究客体进行踏勘，了解地质体的全貌；然后在相应的地质图上、结合野外地质情况确定穿越路线及测制剖面的位置以及大致估计采样数量等。

野外地质观察内容：

（1）查明各地质单元之间的相互关系。适当采集样品（在同一取样点上最好同时取光谱分析样、岩石化学样品及包裹体样品等），实测地质剖面。

（2）在野外地质观察的基础上，选择详细研究地段。例如：岩体接触带、岩相过

渡带；矿化地段的矿体、矿脉，甚至较大的矿物晶体。在详细研究地段里要求做深入细致的地质观察。观察过程中除进行相应的地质描述外，还应该测制各种比例尺的地质草图。地质制图的比例尺应根据地质体的大小而定，一般可采用1:500到1:1（甚至1:0.5）。最好采取逐级放大，形成一套完整的地质图。

例如：在岩浆岩及有关矿床的地区工作，可考虑从下列几方面进行地质观察与研究。

A. 圈定岩体范围，搞清岩体构造，即：

岩体形状、产状及大小。

岩体内外接触带构造。侵入体围岩及蚀变程度（通过围岩的变质类型大致确定岩浆干、湿程度）。

岩体内外接触带断裂构造（平行和垂直接触面的断裂）及充填物。

岩体内部岩相带（由边缘至中心，冷凝外壳；捕虏体分布范围，种类、数量及长轴方向；岩相之间的关系以及岩石特征变化）；岩体内部裂隙构造发育情况和充填物。

岩体围岩中裂隙系统的测定。

测制反映岩体地质构造特征的综合剖面，并采集有关样品。

B. 控矿构造：

褶皱、断裂。控矿构造与岩体原生构造的关系。

矿化带特征；矿体和矿脉分布及其与上述构造的关系。

矿体或脉体构造：矿体或脉体的形状、产状、大小由边缘到中心物质成分（矿物组合）、结构、构造的变化。

脉体中的晶洞：透明矿物晶体、带状生长的矿物晶体。

垂直矿体走向进行取样；尽量采集定向标本。

沿矿体、矿脉走向（和垂直走向）测制剖面；除反映地质构造特征外，应把所有样品测在平面和剖面图上。

最后，对地质资料进行整理、小结，拟定初步实验方案。

2. 实验工作内容：

（1）样品分析鉴定：包括光谱分析；岩矿分析及岩矿鉴定。建立矿物的生成顺序表。

（2）根据分析、鉴定结果对地质资料进一步补充，制定实验方案。

（3）包裹体研究：

制备包裹体样品；测定温度（包括爆裂温度和均一温度）、压力。进行包裹体特征分析及测相研究。

分析包裹体中气、液、固相的化学成分、矿物成分和同位素组成；实测包裹体溶液的PH值并计算Eh值。

整理包裹体信息数据，总结信息系列及其关系。

（4）参数计算：根据包裹体信息，计算矿物生成时的有关参数（如生成自由能、逸度、活度和PH、Eh值等）。选择典型包裹体进行热动力测相。

（5）模拟实验：按包裹体提供的数据，用简化后的体系进行人工包裹体实验（用

石英管或高压釜做容器进行实验)研究。

(6) 编制综合图表:如爆裂活度图、热晕及蒸发晕图;丰度图;熔体相图、流体相图,流体——熔体相图以及各种相关图等。

(7) 进行矿物生成过程的热动力分析及熔体、流体、熔体——流体体系的相分析。

3.开展地球化学分析:对野外地质资料和室内实验数据进行综合整理后,找出元素迁移、富集规律,指出找矿方向。

三、与其他学科的关系

1.构造地质学:岩体和矿床都受一定构造条件控制。构造地质学是包裹体地球化学的地质基础。搞清研究客体的区域地质构造位置以及构造活动的多次性、离心性与成岩成矿物质析出的脉动性之间的关系是查明元素演化规律的前提。同样,某些宏观地质现象不清的构造系统也可以利用包裹体地球化学的方法来帮助确定其性质及构造活动的时间、空间关系。

2.矿物学:矿物是包裹体地球化学研究的直接对象,包裹体被圈闭在矿物晶体的缺陷之中,包裹体溶液和熔体就是成矿母液。可见,两者互为依存。同时包裹体能提供矿物的生长条件,因此它是成因矿物学的重要组成部分。用人工矿物中的包裹体同样可以帮助查明包裹体的形成机理并验证包裹体信息的可靠性,所以说矿物学又是包裹体地球化学的基础。

3.岩石学:岩浆岩由岩浆结晶固化而成,熔融包裹体又是天然岩浆的样品,所以它们之间的关系是相当密切的。如岩浆包裹体通过熔化过程体系平衡条件的测定,便能帮助了解成岩机理。同样,根据实验岩石学的理论又能帮助分析包裹体中熔体演化的机理。

湿体系的熔融包裹体是含水(和其他挥发组分)硅酸盐体系。研究这种包裹体,能直接观察岩浆与热液之间关系。例如在含水硅酸盐体系中,硅酸盐的溶离作用;流体与熔体分离的时间、空间及其方式等。如果说高温高压实验为岩石成因找到了理论根据,那么熔融包裹体便是最真实的透明高温高压实验装置。所以,大力开展熔融包裹体研究,将能使岩石成因理论更接近实际。

4.矿床学:矿床成因论是矿床学的理论核心,而包裹体地球化学则是定量的矿床成因论。开展矿石矿物中包裹体研究不仅有理论意义,而且有具体数据,所以它能对矿床的成因归属进行定量分析。如:温度范围为250—350°C称为高温热液矿床。又如研究岩浆包裹体中金属熔体和硅酸盐熔体随温度升高混溶度增大,随温度下降混溶度降低,即发生熔离作用等。

熔体—流体演化过程是岩浆中成矿组分迁移富集的过程。把成因上有联系的熔融包裹体和流体包裹体统一起来研究能查明成岩作用和成矿作用的相互关系。在了解流体包裹体成分、性质变化的基础上,能直接阐明成矿流体的组成及其迁移富集的规律。

5.化学:包裹体地球化学的核心是热动力“测相”,热动力测相必须建立在对包裹体中组分及相态精确分析的基础上。因此包裹体地球化学与分析化学息息相关,没有高

超的分析技术不可能得出精确的数据。高超的技术需要有正确的理论指导。化学是包裹体研究的指导理论和实际基础。

热动力测相直接用热力学理论来分析各种矿物生成时与热力学条件变化的关系。通过不同矿物生成和介质相态变化的热动力条件分析查明其热力学规律。因此,整个热动力测相过程都应该用热力学理论作指导。

6.应用地质学研究:人类研究自然、掌握自然规律的目的在于征服自然 为人类造福。地质理论研究的目的在于指导找矿。用爆裂活度、热晕、成矿元素蒸发晕寻找盲矿已开始得到较好的效果。利用热动力演化规律进行理论找矿在地质应用中是今后应注意的方向。

包裹体研究在应用科学上绝不仅是局限于地质学的范围内;冶金、人造宝石、人工晶体以及陶瓷、化工原料等等,甚至环境保护工作也开始引用包裹体的研究成果。

总之,包裹体地球化学是一门很有前景的地质学分支。然而它又是一门新近才发展起来的学科,无论从基本理论、研究方法、研究技术,或者是在应用方面都还不成熟。所以,加强上述各方面的工作,紧密与其他学科互相配合、相互渗透,及时引进先进技术、先进方法及先进理论是包裹体地球化学研究中的重要任务。

四、今后研究方向

1.加强基本理论研究:

(1) 注意矿物缺陷形成条件与包裹体形成机理之间关系的研究。例如原生、假次生、次生包裹体形成机理的研究。尽快充实并完善包裹体基本假说。

(2) 加强熔融包裹体测相研究,累积资料建立由超基性岩—基性岩—中性岩—酸性岩、超基性—碱性岩及变质岩等岩石的矿物中包裹体相图。

(3) 采用天然包裹体和人造包裹体相结合的方法,制作流体包裹体相图。

(4) 加强硅酸盐熔体、硅酸盐—易溶盐熔体、易溶盐熔体—流体及流体等状态组合之间关系的研究。

(5) 根据热动力测相结果,建立矿物生成顺序热力学参数表。查明元素迁移富集的热力学规律。

2.加强新技术,新方法试验:

(1) 发展冷冻技术,改进冷热两用台,使温度范围增大到 $+1200 - -250^{\circ}\text{C}$ 。在改进和发展冷热两用台的同时建立各种组分的冷冻体系相图。

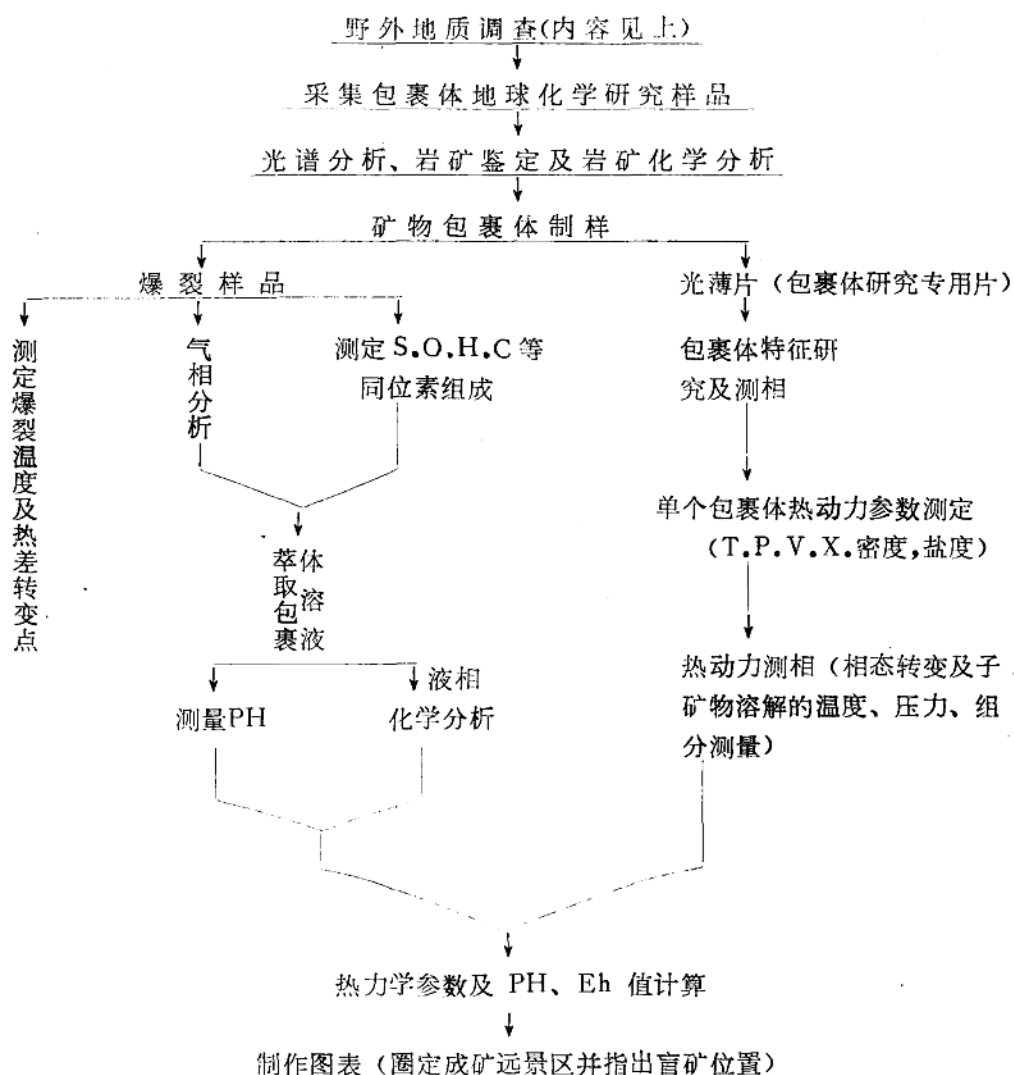
(2) 研制定量测压仪。

(3) 发展和改进色谱仪,提高同位素测定精度。推广包裹体同位素研究。

(4) 提高高温显微热台的放大倍数,加紧研制高温扫描电镜。

(5) 研究各种气体、液体的超微分析技术。

3.包裹体地球化学研究的初步方案:



4. 加强包裹体地球化学人员培训工作,大专院校应开设包裹体地球化学课程(或选修课)。举办科技人员培训班。

5. 加强包裹体地球化学应用研究:

(1) 进行各种找矿方法试验,逐渐累积资料,总结包裹体地球化学找矿方法,其中尤其需要加强对各种超微量指示元素及成矿灵敏元素晕的研究。

(2) 注意包裹体地球化学在其他学科领域中应用的研究。

6. 按系统尽快建立包裹体地球化学研究中心。

第二章 显微镜下研究包裹体及测相

矿物中包裹体是微观地球化学体系，整个研究工作都在显微镜下进行。自然界大多数包裹体直径小于十微米，显微镜下研究很容易被忽视。这样工作中除需要配备高分辨度的显微镜外，认真、细致，正确识别各种包裹体是搞好工作的前提。

§ 1 包裹体的识别及研究对象确定

凡是被圈闭在矿物中，与主矿物有相界面的物质都可以称为包裹体。如矿物中的晶屑、晶粉、岩粉、固熔体分解产物、同一成矿或成岩体系中的早期生成物、矿物生长过程捕获的成矿介质以及主矿物生成后沿裂隙渗入的成矿介质等等。如果严格按包裹体的定义只有后两种才是包裹体。但是，包裹体地球化学是通过成岩成矿过程动力平衡状态的观察、测定来查明元素迁移、富集、分布和分配规律的学科。所以，凡是从同一体系中矿物在生长过程捕获的成矿介质或早期生成物也都能反映该体系在某一阶段的地球化学特征；这些也是地球化学的研究对象。

矿物中捕获的晶屑、岩屑及岩粉是外来物，它们在成因上与所研究体系无关，应该注意排除。外来物的特点是：（1）分布和形态与主矿物结晶习性无关；（2）通常是高温下较稳定的固相；（3）形状不规则；（4）成分与所研究体系无关；（5）常有蚀变、熔蚀现象等。

主矿物生长过程捕获早期生成的固相，虽然不能反映主矿物生长时的动力平衡条件。但仍是体系演化过程平衡条件的记载。所以同样能输送体系演化某一阶段的热动力信息。研究早期结晶固相应该注意与混入的杂质区别。其鉴别标志见表1。

早期结晶物与外来物的鉴别标志

表1

名 称	早 期 结 晶 固 相	混 入 杂 质
分 布	成簇状或星散的自形单晶	孤星状的晶屑或多种矿物晶屑，岩屑集合体
形 态	呈自形单晶	不规则形状
成 分	往往是岩石、矿石的付矿物	与该体系成分无关
稳 定 性	稳定的单晶	有交代、蚀变
均 一 温 度	代表体系演化某一阶段	一般测温困难，具有继承包裹体的特征，即参数杂乱。