

当代地球化学研究的某些新进展(I)

魏 春 生

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002)

关键词 矿床地球化学 流体地球化学

1 矿床地球化学有关成矿理论研究的新突破

(1) 变质热液金矿床成矿理论的确立与完善: 70 年代后, 世界范围内又掀起了新的“淘金热”, 到 80 年代有两次金矿床研究高潮, 90 年代势头不减, 具体表现在 1993 年《Mineral. Deposita》Vol. 28 和《Mineral. Mag.》Vol. 57 两本专辑的出版。前者主要反映了澳大利亚学者(D. I. Groves 等)与加拿大学者(R. Kerrich 等)对太古代绿岩型变质热液金矿床的研究成果, 而后者则主要是美国及欧洲学者关于显生宙变质热液金矿床研究的体现。尽管变质热液型金矿床可产于地壳不同变质级别、岩性迥异的变质岩中, 金矿床规模及品位存在明显差异, 但却有以下共同之处: 大多数金矿床位于高地热梯度带中(造山带及弧后盆地等板块边缘部位)、成矿流体为中低温-低盐度-含硫热液体系、成矿流体富含 CO_2 、 CH_4 、 N_2 等挥发份、金矿床均形成于晚期退变质阶段。

(2) 金相对论效应的提出: 由于金内层电子运动速率接近光速导致对外层电子的屏蔽, 使金的颜色、密度、离子半径、解离能及化学活泼程度发生一系列的明显变化(Pyykk, 1988; Schwerdtfeger 等, 1989 a, b)。

(3) 热液体系中金的 S-As 及 Sb 配合物迁移与浅成低温热液金矿床元素共生组合机理剖析: 中国西南部很多金矿床都富含 As、Sb、Tl 等亲硫元素, 有些甚至可圈出工业矿体, 前人对此曾进行过探讨, 指出高区域背景含量及 Au、As、Sb、Tl 在低温热液体系中溶解-迁移行为类似, 都与以硫的配合物形式搬运有关。但 Arehart 等(1993), Kolapakova 等(1990), Grigor'yeva 等(1981)的实验研究表明, 在偏碱性贫硫低温热液体系中金可以 AuAsS 及 HAuSbS_3^- 等配合物形式迁移, 其溶解度比 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 高约两个数量级以上。因此, 从目前金实验地球化学研究所取得的进展来看, Au-As-Sb±(Tl)的共生有其内在的必然性。

(4) 多元复杂体系中复合配合物和多核簇形化合物(cluster compound)存在的可能性及其地球化学意义: 虽然前人用简单热液体系模拟自然体系取得了巨大的成功, 但自然界本质上是一多元组分构成的复杂体系, 因此全面考虑体系中各主要组分的相互作用才有可能更深刻地了解自然界的本质。

Hennet 等(1988)通过实验研究认为, 在低温热液体系中 Zn、Pb 与 CO_3S^{2-} 所形成的复杂配合物可能是形成 MVT 矿床的关键因素之一。由于热液体系的 CO_2 分压是决定是否形成上述复杂配合物的主要因素, MVT 矿床的形成可能会受压力的控制也是预料之中的事。Berndt 等(1994), Thompson 等(1994)则分别强调了热液体系中金的多硫化物(AuS_nS^- , $n=2\sim7$)与铜的簇形化合物(2~5 个簇)在成矿中的重要性。Ballhaus 等(1994)甚至认为在高温岩浆硫

化物体系中 PGE-Ni-Fe 也能形成簇形化合物(>100 个簇)。由于该簇形化合物的稳定性对体系物理-化学条件的变化极其敏感,Cu-Ni 硫化物矿床中所伴生的 PGE 极不均匀的分布特征可能与此有关。

(5)硫化物表面吸附-抑制作用与卡林型金矿成矿机理再认识:表面吸附是极为常见的自然现象,前人对粘土矿物、氧化物、氢氧化物及有机物表面的吸附-解吸机理进行了长期探索,表面吸附在工业生产中也有重要的应用价值(如造纸、制糖业的脱色等)。但硫化物对水体中重金属污染物的表面吸附却是 70 年代后期随着人类对环境的日益关注才开始的,并在短期内取得了一系列的重大进展。Bancroft 等(1982,1990),Lanfer 等(1985),Renders(1989)的研究表明,硫化物(特别是最为常见的黄铁矿)的表面吸附是造成金在一些含杂质细粒硫化物表面以“不可见”金形式沉淀的有效途径之一,热液流体的 pH 值对金的吸附效率有重要影响。Cardile 等(1993)穆斯堡尔谱的研究进一步表明,吸附在硫化物表面的金以 Au^+ 形式存在,并未被还原成自然金。上述研究将对正确、全面认识卡林型金矿成矿机理及指导今后的勘查、评价,以及合理选择冶流程产生积极的影响。

特别值得一提的是90年代对卡林型金矿中“不可见”金赋存状态的研究取得了突破性的进展。尽管显微技术(SEM、TEM、STM 及 AFM 等)的进步有助于卡林型金矿中“不可见”金分布特征的研究,但该问题的解决一直进展不大。Cohen(1990)将误差统计理论与化学分析结果相结合,极为巧妙地解决了这一难题。可以预计,该方法对微量、分散及稀有元素矿床的研究都有一定的借鉴意义,对确定有用组分的赋存状态并制定选矿流程也有极高的参考价值。

(6)胶体与低温浅成热液金矿:目前热液矿床成矿机理研究的基石是理想真溶液体系。尽管早期一些学者曾猜测过成矿物质以胶体形式溶解-迁移的可能性,但受当时科学发展水平、实验技术条件的限制,以及世界性成矿理论思潮的影响,胶体在成矿中的意义长期未受到应有的重视。Saunders(1994)根据对现代地热体系沉积物结构-构造的研究,强调了浅成低温热液金矿床中胶体成矿的重要性。但 Roedder(1977)在研究 MVT 铅-锌矿时就从逻辑上提出矿物的胶体结合并不一定意味着成矿物质以胶体形式迁移,矿物的沉淀速率远远大于其成核-结晶速率的动力学效应也同样可以造成矿物的胶状结构。因此,胶体地球化学及成矿物质结晶-沉淀速率的动力学行为可能是低温热液矿床成矿机理研究中亟待解决的重要课题之一。

(7)深海探测的新发现与白云鄂博 Fe-REE 超大型矿床成矿机理透视:Olivarez 和 Owen(1989)发现海底热液中的 ΣREE 明显亏损,甚至低于海水平均值。进一步的研究发现海底热液沉积物(主要是 Fe-Mn 氧化物及其氢氧化物)高度富集 REE,据此提出了海底热液沉积物表面吸附与现代海底热液 ΣREE 显著亏损的新观点。随即,Koeppenkastrop 和 De Carlo(1992)的实验证实了上述观点。因此在研究白云鄂博 Fe-REE 超大型矿床成矿机理时不应忽视表面吸附可能起的作用,以期对其成因有更为全面深刻的认识。

(8)盆地演化、油气生成与金属成矿:基于目前所发现的大多数 MVT 型 Pb-Zn 矿产于碳酸盐建造的不整合面的地质事实,Eisenlohr 等(1994)指出,海平面周期性升降产生的碳氢化合物是驱动与 MVT 成矿有关的热液流体自盆地中心高地热梯度带向盆地边缘、与造山碰撞相毗邻并发育有一系列低角度逆掩断层的低地热梯度带逆向迁移的主要原因。Dewers 等和 Cartwright 等(1994)的研究还表明盆地水具不连续-非线性迁移的特征,这可能是造成众多与盆地演化有关的中-低温热液矿床表现出“多期成矿假像”的主要原因之一。

前人对流体不混溶在成矿中的重要性予以充分的重视,并进行了详尽的研究与讨论。Yardley 和 Bottrell(1988)的研究则发现富含有机质流体的不混溶会降低岩石的有效渗透率,增大流体的静水压力,从而直接导致水压破碎(hydrofracture)的形成并控制矿体的空间定位。

实验研究发现,尽管有机酸对胶体金的吸附-还原速率大体相近,但腐殖酸所吸附的金颗粒较粗($\sim 60\text{nm}$),而富里酸吸附的金颗粒则相对较细($\sim 20\text{nm}$)(Machesky 等,1992)。

尽管人们很早就注意到大多数沉积盆地中油气与金属矿产在空间上紧密共生或伴生,二者可能存在某种内在联系,但由于缺少相应的热力学资料,金属成矿与有机质之间的相互关系长期处于定性阶段。90年代以来,Helgeson 等对热液体系中有有机质热力学行为进行了初步研究(1994, 120°C , 40MPa 热液中壬烷的溶解度),可以预计今后该领域的研究将会取得重大突破。

作者认为,在强调有机物质对金属成矿起重要的作用的同时,切不可忽略无机组分对有机质演化的反作用,因为自然界是相互作用、相互对立的统一体。Mango(1983)发现成岩过程中 H_2S 的形成对碳-氧化合物的产生有一定影响。Mango(1992),Gozin 等(1993)的研究进一步证实流体中的过渡金属元素对 C—C 键的活化有强烈的催化作用,而 Bell 等(1994)的研究则表明矿物表面能加速醋酸的热降解。但中国科学院地球化学所及 Fein 等(1994)的一些初步研究发现,有些矿物(如燧石、重晶石等)和流体中可溶性铝对有机组分的成熟度草酸脱羧基速率有一定的抑制作用。

(9)矿源层(岩)与成矿元素的赋存状态:矿源层(岩)概念的提出对矿床学的研究无疑起了划时代的作用。但除极少数情况下存在高背景/低背景的异常地质体外,大多数矿床所在区域似乎并无特定的矿源层(岩)。此外,目前尚缺乏有效的手段来追踪成矿物质(金属?)的可能来源,以及某些成矿物质可能来自深部而不是矿床周围直接出露的岩石等逻辑困难(Dnane 等,1991)。目前矿床学家更加关注成矿物质在岩石中的赋存状态而不仅仅停留在成矿元素丰度值的测定上。Eugster(1985),Durasov 等(1993)研究了岩浆结晶-分异演化过程不同成矿元素在主要造岩硅酸盐矿物中的分布特征及其在后期热液成矿阶段活化-迁移程度的差异。Spooner(1993)则强调了亲硫元素在岩浆演化过程中优先择位赋存于岩浆硫化物中的重要性。除上文对岩浆作用过程中成矿元素赋存状态的研究外,作者认为在研究成矿元素在沉积建造中的赋存状态时应充分考虑成矿元素在粘土矿物、有机物、沉积硫化物、氧化物、氢氧化物及非晶态胶体物质表面以吸附态存在的可能性,似乎成矿物质从吸附物表面的活化-迁移要比直接从矿物晶格中活化-迁移容易得多(?)。

(10)活动板块边缘物质再循环与 LILE 成矿辨析:中国东南部有大面积中—新生代花岗岩出露和 W-Sn 等矿产的分布。前人对这一地壳活动单元与矿产的关系进行了多层次、全方位的研究,取得了一系列具国际水平的研究成果(中国科学院地球化学所、南京大学及广东省地质矿产局等)。最近,Plank 等(1993)从物质再循环与不相容元素进一步相对富集的角度讨论了活动板块边缘 LILE 成矿的内在机制。但 Allegre 等(1982,1986)认为,地壳物质通过板块俯冲带的再循环并不是无限制的,在地壳以下大约 670km 处存在“俯冲障”。而 Doglioni 等(1993)的研究表明,板块的运动并不是随机的,在全球尺度上有向西漂移的总体趋势。

(11)喀斯特与成矿:与碎屑沉积岩、火成岩及变质岩相比,碳酸盐建造发育形成的喀斯特古岩溶重力滑塌构造是形成矿床的有利地质部位,它不仅是成矿流体定向迁移的通道,而且是

容矿的有利空间(Olson, 1984), 估计现代与古落水洞中的铝土矿以及中国西南部一些筒状 Pb-Zn 矿的形成可能与此有关。

(12)地震、流体定向迁移与成矿: 尽管是否有流体活动以及流体的来源、性质与组成是决定能否形成热液矿床及其类型的先决条件, 但流体的迁移方式(分散 vs 定向集中)及其演化途径却是控制热液矿床规模和工业价值的重要因素。因此, 凡能导致流体定向迁移的作用都可能是潜在的成矿作用。

地震作为自然灾害的确有其不利的一面, 但地震的孕育、发生与发展过程始终与地壳应力的周期性调整有关。所以, 从这个意义上说, 地震活动有可能使流体产生大规模定向迁移, 并且不排除在特定的地区和时代(地震-火山多发区), 地震成为主要成矿作用的可能性(Lopez 等, 1993)。

Boullier(1992)通过对加拿大魁北克太古代 Abitibi 绿岩带中 Val d'Or 金矿床流体包裹体研究证实其形成与古地震活动有关。Phillips 等(1994)的研究也表明一些高硫煤的形成可能与地震引发的洪水有关。Sibson 等(1975), Berylee(1993)则进一步强调与地震活动相伴随的构造超压流体的脉动-振荡(seismic pumping)也可能是造成“多期成矿假象”的重要原因。

因此, 除注意渤海湾、东南沿海等板块边缘火山-地震带与成矿的可能关系外, 应特别重视西南三江流域现代板内地震-裂谷活动带与成矿的关系。

(13)高寒冻土带砂金形成机理再讨论: 前人对高寒冻土带砂金广泛分布进行过分析, 认为可能与冰的净化作用所形成的高盐度流体有利于金的迁移-搬运有关(Watterson, 1985; 涂光炽, 1992)。最近的研究表明还应考虑下列因素: $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 条件下有机物表面吸附金的效率大大降低, 可能是导致金长距离迁移-搬运形成砂金的重要原因(Fedoscyeva 等1993); 由于水具“热缩冷胀”的特性, 因而高寒冻土带由于冰劈作用而产生的物理风化极为显著, 它所形成的微裂隙也有利于搬运金的流体长距离定向迁移; Hollister(1991)对阿拉斯加砂金的研究发现大多数的砂金矿可能与原生变质热液金矿床有一定的成因联系, 即原生金矿发育区更有利于砂金的形成。此外, McGinnis(1968)还注意到冰川侧向压实作用所产生的压力梯度对伊利诺斯-威康星盆地中原生层控 Pb-Zn 矿床的形成也有一定的控制作用。

(14)镧系收缩、库伦定律与成矿热液蚀变过程中 REE 活化迁移规律: 尽管 REE 在岩浆起源-演化研究中取得了巨大成功, 但由于缺乏热液体系中 REE 地球化学的基本热力学资料, 稀土在热液矿床中的应用极为有限。根据 Pearson 软硬酸碱理论, REE 属硬酸, 它易与 F^- 、 Cl^- 及 CO_3^{2-} 等硬碱以离子键配合。由于 REE 元素的离子半径随原子序数增大而依次递减(即镧系收缩), 所以根据离子间静电引力与离子间距离的平方成反比的库伦定律可知, 在热液蚀变过程中 REE 配分模式将发生分异, 并且与未蚀变岩石相比, 遭受热液蚀变岩石(矿石)的 HREE 将出现不同程度的亏损(Bau, 1991)。

(15)成矿系列之地球化学机理初探: 成矿系列概念的提出不仅对矿产勘查有十分重要的指导作用, 而且对从整体上研究矿床之间的成因联系提供了理论依据。那么, 在同一地区产出同一矿种的不同类型矿床(即成矿系列)的原因是什么呢? 对热液矿床而言, 可能同一起来源(成因)流体不同的演化途径是这一现象的根本所在。如胶东金成矿带下部韧性剪切带中由水-岩相互作用所控制的热液蚀变作用可能是金沉淀的主要原因, 因而矿床以浸染交代型为主(焦家式); 与之相反, 浅部的脆性断裂带中, 由于压力锐减而使流体沸腾导致金的沉淀与石英脉的形

成,所以以石英脉充填型为主(玲珑式)。G roves 等(1993)及 Kerrich 等(1993)分别依据产于澳大利亚 Yilgarn 及加拿大 Abitibi 太古代绿岩带中变质热液金矿研究成果所提出的地壳连续模型也基本与此类似。即便同一起来源流体以相同途径演化(如水-岩相互作用),由于围岩/主岩岩性的差异也会形成不同类型的金矿床,Bohikle(1989)认为加州 Alleghany 金矿区中不同类型的非整合脉状金矿即以该种方式形成的。

2 流体地球化学

(1)流体与地幔演化:Gasparik(1993)的实验研究表明地幔岩的多组分特征以及存在 H_2O 、 CO_2 、 F_2 及 Cl_2 等流体挥发份使上地幔的最高温度只能达到 1350°C ,这可能是上地幔总是处于部分熔融而不是全融的根本所在。Peterson 等(1989)的研究也证实上地幔中 CO_2 会加剧含黑云母岩石的熔融,而 Gaetani 等(1993)则发现 H_2O 含量高低对俯冲带中火成岩的组成有明显的控制作用。Le Pichon 等(1993)甚至认为地幔及俯冲地带中流体含量的高低对板块俯冲及剥蚀速率都会产生显著的影响。由于目前通过实验只确定了 890MPa 、 900°C 范围以内 H_2O 的 PVT 特性,远远无法满足在地壳深部及地幔条件下研究流体行为的需要,Brodholt 等(1993)运用分子力学理论模型计算了 2500K 、 35MPa 范围内 H_2O 的热力学性质。Pawley(1993)研究发现地幔中水部分以 OH^- 形式存在于含水矿物中,而 H^+ 则以类质同象的形式取代 Al^{3+} 等杂质而分布于斯石英中;Gautason 等(1993)通过对钙钛矿氧扩散行为研究所发现的下地幔以离子导电为主的结果支持上述认识。

关于板块俯冲带中流体的来源,通常认为主要是由闪石的脱水反应提供的,但 Pawley 等(1993)的研究发现洋壳中其它次生含水矿物(如绿泥石、绿帘石、海绿石及伊利石等)也能随俯冲板块到达地壳深部(上地幔?),成为板块俯冲带中流体重要的潜在来源。

青木等(1993)实验发现在地幔高压相中 CO_2 可能以固态形式存在,并给出了固相 CO_2 的晶胞参数。随后,Schrauder 等(1994)在天然金刚石样品中发现了固态 CO_2 。

尽管赤道附近是地球表面最炎热的地区之一,但据岩石学及卫星重力资料的研究,地幔温度却低于全球平均值约 150°C (Bonatti 等,1993)。

(2)榴辉岩、麻粒岩及碱性岩中富含碳氢化合物流体包裹体的发现及其意义:80年代后期对高级变质岩所产生流体的研究发现了大量碳原子数 >2 的碳氢化合物。一些人认为,在高级变质条件下能形成富含碳氢化合物的特殊流体,并且流体包裹体代表均匀捕获结果;另一些人则认为这可能反映选择性捕获的结果,即高级变质流体与中-低级变质流体没有根本性的差别,高碳氢化合物在矿物表面的择优润湿特性是流体包裹体富含碳氢化合物的主要原因。而 Hall 等(1990,1991)则认为这可能与流体中有关组分(特别是 H_2 和 H_2O 等)的差异性扩散丢失有关。Hall 等(1993)用实验确定了 850°C 条件下水在石英中的扩散速率大约为 $10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$ 。而 Mavrogenes 等(1994)对斑岩型铜矿中石英所含黄铜矿矿物的溶解行为的研究也证实,在一定的条件下流体包裹体确实会表现出开放体系的特征。无论如何,上述研究将促使人们对流体包裹体研究所依赖的两个重要前题(封闭与均匀捕获)进行认真的反思,相信这将会提高流体包裹体的研究水平,而丝毫不会动摇流体包裹体在流体地球化学研究中的重要地位。

最近杉崎等(1994)提出从同位素角度研究高级变质流体中碳氢化合物的成因(生物 vs 非生物)可能是解决上述争论的关键。

(3)高温超临界流体性质的变化与中-低温热液成矿内在关系讨论:虽然岩浆期后及变质

峰期都能产生热液流体,但无数事实表明大多热液矿床具中—低温成矿特征,即使产于闪岩相以上变质岩中的变质热液型金矿床也不例外(Groves 等,1993)。据 Oelkers 等(1993)的研究,含电解质的流体在高温超临界条件下会由于电解质的聚合作用而使流体的活性大为降低,流体无法有效大规模地搬运成矿物质,这可能是与高温地质作用有关的热液流体通常表现为中—低温成矿特征的根本所在。当然,热液成矿流体中各种主要配合物的溶解度随温度下降而急剧降低,以及地壳浅部可导致成矿配合物沉淀的因素明显增多(如大气降水、同生海水的混合稀释、流体减压而发生的相分离,以及化学不平衡所产生的强烈水—岩相互作用/热液蚀变等)也可能是大多数热液矿床表现为中—低温成矿特征的原因。

(4) 变形—变质—流体与造山带:

①弧后扩张盆地有限相系浅变质作用 p - T - t 轨迹反时针演化理论的提出与确立:继 England 等(1984)提出与大陆碰撞造山相伴随的区域变质作用顺时针“马蹄形”的 p - T - t 演化轨迹后, Sandiford 等(1986), Robinson 等(1987)先后从理论上论证了弧后扩张盆地有限相系浅变质作用 p - T - t 轨迹反时针演化的可能性。Winslow 等(1994)利用流体包裹体首次在自然界确定了该演化轨迹的存在。该理论的基本点是:尽管板块俯冲带总体处于挤压状态,但俯冲带深部的局部对流会使弧后地壳处于拉张状态而形成弧后扩张盆地。伴随着弧后盆地的持续拉张,大量富含不相容生热元素(K、Th 及 U 等)的沉积物快速堆积而使温度、压力迅速上升(Chamberlain 等,1990);同时,由于地壳拉张变薄而使下地壳—上地幔冷凝收缩也会释放出大量热量;此外,弧前板块俯冲带部分熔融所衍生的岩浆侵位也会带来部分热量。然而,由于明显受板块俯冲方向、速度及俯冲幅度的控制,弧后拉张盆地的活动“寿命”极其有限(Pavlis, 1989, 1993; Miller 等, 1991),伴随着大规模的碰撞造山,由地壳增厚所产生的 $+\Delta p > +\Delta T$ 而使弧后扩张盆地有限相系浅变质作用的 p - T - t 轨迹表现出反时针演化的特点。

②相应于造山带的研究,流体包裹体的另一研究重点是低级—浅变质作用的研究。由于低级浅变质通常难于达到矿物—化学平衡,因此流体包裹体就成为浅变质作用研究“唯一”有效的手段(Mullis, 1987; Jenkin 等, 1994)。于9100m处终孔的德国大陆科学钻探项目(KTB)又取得一系列重大发现:井底发现280℃的高盐度卤水;地壳深部存在流变状态的岩石;地应力极高。

③断裂破碎带力学性质与渗入其中流体的来源:断裂破碎带是流体运移的有利通道,但渗入其中的流体来源却长期争论不休(Sibson, 1988; Pickthorn 等, 1987; McCaig 等, 1990)。Nesbitt 等(1989)认为在张—张扭性断裂带中以大气降水的渗透为主,而压—压扭性破碎带中则主要是变质流体的渗入。但笔者认为实际情况可能远比上述设想复杂得多,特别是韧性剪切带,在空间上有垂直分异的特征(下部以压—压扭性为主,上部则表现为张—张扭性),且其力学性质还会随时间而变化(早期可能以压—压扭性为主,晚期则可能会表现为张—张扭性),因此可以预计在同一断裂带中出现两种或两种以上来源流体的情况也不是一定不存在。应当指出的是,流体不仅是物质转移的有效媒介,而且也是热/能量传输的主要途径(Bickle 等, 1987)。最近 Koons 等(1987, 1991), Platt 等(1994)详细讨论了流体迁移的热与机械力学效应。

④次生变形流体包裹体与古构造力场的恢复:长期以来以原生流体包裹体为研究的主要对象,尽量避开次生包裹体似乎成了所有流体包裹体专家共同遵守的信条(Roedder, 1984)。但最近几年 Pecher 等(1985), Laubach(1989), Cathineau 等(1990)利用次生、变形、定向分布的流体包裹体成功地恢复了古构造应力场。

⑤变形与变质:尽管大陆上几乎所有的变质作用(可能埋藏变质除外)都伴有不同程度的变形,但深海钻控结果却出乎人们的预料之外,洋底到绿片岩相的变质也无明显的变形(玄武质原岩能较好地保存其枕状构造不变)。

(5)碳酸盐和粘土矿物的相互作用与富含 CO_2 流体的产生:产于碳酸盐建造中的热液矿床的成矿流体普遍富含 CO_2 ,但对 CO_2 产生的详细机理却知之甚少,推测可能与有机质的氧化-热降解或碳酸盐的溶解有关。基于大多数热液矿床在空间往往与含粘土矿物较多的不纯灰岩紧密共生的基本地质事实,Hutcheon(1990,1993),Huang 等(1994)特别强调了碳酸盐-粘土矿物相互作用在形成富含 CO_2 成矿流体中所起的重要作用。

(6)水-岩相互作用的物理效应:尽管水-岩相互作用是造成岩石及流体化学组成发生明显变化的主要原因,并且化学方法是研究水-岩相互作用最为直接、有效的手段之一,但这绝不意味着水-岩相互作用只产生化学变化而无物理变化。Huang 等(1992),Whitworth 等(1994)认为在水-岩相互作用过程中伴随着部分矿物的溶解(如长石、碳酸盐矿物等)而使岩石的渗透性(孔隙度)增大,从而更有利于流体(包括油-气)的迁移与成矿。

但水-岩相互作用既能造成矿物组分的溶解,又可在一定条件下导致有关矿物的再沉淀(通过改变流体的物理-化学条件)。Fournier(1991)特别强调了矿物再沉淀及热液蚀变在减小岩石孔隙度(裂隙愈合)、使流体由静水压力转化为静岩压力过程中所起的关键作用。以往主要是通过测定岩石的密度计算出岩石的渗透率,Johns 等(1993)利用工业/医用 CT 成功地研究了天然岩石样品的孔隙分布特征。

(7)喇曼位移与流体内部压力计:与流体测温相比,流体压力的研究极为困难且很不完善。Thomas 等(1990),Chou 等(1990)分别利用流体组分的拉曼谱随压力而变化的特性来研究流体包裹体的内压,取得一定进展。

(8)流体包裹体 IR 显微观测的新突破:继 Campbell 等(1984)率先使用 IR 显微技术研究与石英共生的黑钨矿、锡石所含的流体包裹体并发现二者的均一温度及盐度都存在较大差异后,研究者开始关注并尽量选择与成矿阶段较为接近的金属硫化物或热液蚀变硅酸盐矿物作为研究对象(张国平等,1992;Coldfarb 等,1991),而不仅仅满足于脉石矿物(如石英等)流体包裹体的研究。Richards 等(1993)利用 $\lambda \leq 1.9\mu\text{m}$ 的红外显微镜成功地观测到了黄铁矿所含的流体包裹体及矿物分带现象,企望不久可调波长的红外显微镜能成为流体包裹体研究的常规手段。

(9)最新流体地球化学计算程序:Belonoshko 等(1992)已发表包括 C-H-O-N-S-Ar 多元组分的混合状态方程计算机程序(SUPERFLUID)。Johnson 等(1992)则给出了 $0\sim 1000^\circ\text{C}$, $(1\sim 5)\times 100\text{MPa}$ 范围,常见无机、有机组分与矿物的热力学计算程序(SUPCRT 92)。