

成矿流体研究的内容及其进展

梁俊红, 金成洙, 王建国

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 成矿流体的研究主要包括流体的广域穿层效应、地幔流体成矿作用、成矿流体热力学、动力学等几个方面。高温高压成矿流体、气-液相分离、成矿流体专属性等成为流体热力学研究的关键, 成矿流体传输动力学、构造动力学成矿作用、化学反应耦合动力学成为成矿流体动力学研究的焦点。

关键词: 广域穿层效应; 地幔流体成矿作用; 成矿流体热力学; 成矿流体动力学

中图分类号: P59 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2001)04-0219-07

20 世纪 70 年代以前, 人们注重于研究不同成因流体与矿床形成之间的关系。随着现代科学技术的发展及其在不同地质领域的运用, 连同地质科学本身的巨大进展, 对于地球内部流体的研究已经远远超越了流体与成矿这一领域, 它被广泛引入到流体地球和固体地球的相互作用、地球整体动态环境与地球流体广域穿层效应、自然灾害等方面。到 20 世纪 90 年代中后期, 地壳规模流体的远距离、长时间的运移得到了证实。

1 地球内部流体的广域穿层效应

随着大陆超深钻和海洋钻的开展, 对流体的存在深度有了突破性的认识。就成矿流体来说, 原苏联的科拉半岛的 12 262 m 的超深钻孔中, 发现在 12 km 多的地壳范围内存在有大量的自由水为主的流体, 而且随着深度的增加, 流体不是减少而是增加; 流体的流动方式不仅是有晶格内和颗粒边界运移方式, 而且发现了像地表流动方式的深部流动。德国的 KTB 超深钻, 深达 9 101 m, 位于副片麻岩和变质基性岩带, 发现钻孔深部存在惊人的大量游离流体, 且充满游离流体的破碎带或含流体层达 20 多层, 为富含烃的“干”流体与富含盐的(Ca-Na-Cl)的热水流体, 并强烈地进行着热液蚀变作用。大量的科学实验方法也证明地壳中存在有大量的流体, 例如水库诱

发地震法、地壳低速带、地壳中地震波衰减带、流体包裹体等研究结果测得流体存在的深度分别为 0 ~ 12 km, 7 ~ 12 km, 7 ~ 12 km, 0 ~ 10 km。

火山喷发过程把数量可观的 H_2O , CO_2 , CO , CH_4 , N_2 , H_2S , H_2 和稀有气体从地壳的深部带出来, 因而人们常把火山喷发作为地球深部研究的天然超深钻。现今美、法、日、加、澳等发达国家的海底热液活动观察业已发现并证实: 东太平洋正在活动的高温热泉和停止活动的块状硫化物矿床, 东太平洋超快速扩张脊正在活动的全球最大的热液云团, 黑烟囱式块状硫化物矿床, 海底热泉、气泉广泛存在。

自 1971 年 Touret 首次在挪威南部研究了片麻岩中的流体包裹体, 发现了大量 CO_2 流体的存在。这一发现改变了人们传统的认为变质作用是脱挥发分的过程。从而引起了人们对地幔流体的重视。近几年来, 人们在地表取得标志地下 200 km 左右深度的上地幔包裹体样品, 发现其中含有大量以 H_2O , CO_2 为主的 C , O_2 , N , S , H_2 等流体。路凤香等(1999)对金刚石共生矿物的研究资料表明: 金刚石的形成与 H , C , O , N , S 为主要的深部地幔还原型流体有关^[1]。杜乐天称地幔流体为幔汁, 并将其归纳为 HACONS, 其可能是一种富含有氢、卤素、碱金属、碳、氧、氮和硫的复杂化合物系统。

对于核-幔边界、外地核超深流体的研究, 有地震的不均一性和多种实验证明, 核-幔界面可能是地幔对流的下界层。地核外层被认为是一个巨大的

岩浆房,以液态铁为主,并熔有约 10% 的以氢为主的轻元素,弹性刚度较小,近似水的粘度^[2]。

2 地幔流体和成矿作用

成矿作用绝大多数发生在上地壳浅层,深度一般小于 3 km。热液矿床的研究,往往把大气降水认为是成矿流体的主要成分,只是提及成矿作用中有少量的变质水和岩浆水的参加,而常常把地幔流体的作用忽视。近年来对深部流体、深部构造研究的日渐深入,使地幔流体与成矿作用成为流体地球科学的前缘,并提出了地幔流体成矿说,该成矿理论认为地幔流体穿过上地幔和莫霍面,在适当的物理化学条件下,与岩石圈地壳物质发生相互作用产生挥发组分和活动组分,从而发生地幔流体成矿作用。

杜乐天(1999)认为,岩浆作用和热液作用均与地幔流体作用有关,且地壳中的热液作用和地幔流体可以经过两种途径相联系。第一种情况是处于拉张环境中,地幔流体可以沿断裂很快地上涌,与下地壳岩石来不及充分反应即可以达到上地壳浅部,形成与岩浆无关的陆上和海底的热液成矿作用;另外一种情况,当地幔流体处于地壳的挤压环境下,地幔流体不容易快速上升,从而与下地壳的岩石长时间的反应,就会产生熔融和岩浆作用,一旦有了岩浆柱,地幔流体重新有了上升的通道,达到地壳的浅部进行热液成矿作用。相当富碱烃的地幔从深部进入盆地就会和干酪根化合形成胜利油、气田以及盐层;当它进入富 Au 的基性变质岩和混合花岗岩就形成胶东金矿床^[3]。这一理论的应用将有机矿床和金属矿床的成矿作用有机地统一起来。

最新的资料表明,地幔流体和地幔交代作用存在对一些大型矿床形成的影响。曹荣龙(1994, 1995)研究认为,内蒙古白云鄂博稀土矿就是国内罕见的地幔流体交代矿床,并且强调了热液成矿中碱交代、氟交代的重要作用。新疆尉犁县且干布拉克超大型蛭石矿是地幔交代成因的非金属矿床^[4, 5]。

3 成矿流体热力学研究

流体的热力学性质对于理解各种地球化学行为至关重要,这些信息通常是通过实验观察获得。主要

包括:①流体 $P-V-T-x$ 相关关系的研究,主要的对象是 H_2O-CO_2 -盐类多组分体系高温高压下相图的实验和理论研究;②矿物在流体中的溶解度及溶解后在流体中溶解类型和力学性质-平衡常数及各种偏摩尔性质的研究;③流体的热力学模型化研究;④超临界流体的相关关系和化学反应等特征性质;⑤新的单个包裹体测试技术的发展。但是,受到客观条件、时间、经费的限制,实验的资料一般均局限在大自然的很窄的范围内。为了获得实验尺度范围以外的流体的各种物理化学性质、常建立经验、半经验的模型,随着计算机运算功能的扩大,运用分子动力学和蒙特卡罗法(Monte Carlo)进行的计算机模拟成为克服实验室实验和理论缺陷的有用的工具^[6];流体包裹体热力学参数计算机软件相继出现,其中以 Brown(1989, 1995)设计的 Flincor 软件为代表,更方便、快速、准确地计算出流体热力学参数,并运用到太古代金矿床的研究中^[7, 8];Johnson 等(1992)完成的 SUPCRT-92 模型及软件包达到了地球化学模型研究的高峰, SUPCRT-92 包括有 29 种水合物种, 86 种有机物和 179 种矿物的热力学数据库,可以计算 1~500 MPa、0~1 000 范围内的地质上需要矿物、气体和流体中的溶解物的标准热力学性质及其互相间的化学反应^[9]。国内学者刘斌、沈昆(1999)在《流体包裹体热力学》一书指出了流体氧逸度的运算程序^[10]。

3.1 地质流体成分

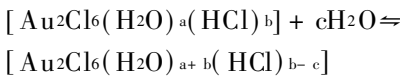
地球流体成分的模型可以概括为: $H_2O-CO_2-H_2S-H_2$ (或 O_2)-氯化物盐类-二氧化硅,大多数情况下还有 CH_4 和 N_2 等组分,其中氯化物主要指 $NaCl$, $CaCl_2$, KCl , $MgCl_2$ 。根据组分的不同可以归入一元体系、二元体系和多元体系。近年来的研究,一元体系主要包括 H_2O , CO_2 , CH_4 和 H_2S 等;二元体系可分成不同性质的两类:第一类二元体系中没有液体不混溶区,而有一个连续的三相表面和一条连续的临界曲线,例如 $H_2O-NaCl$ 体系,第二类二元体系则具有不混溶区间,即具有不连续的三相区和不连续的临界曲线,例如 H_2O-CO_2 和 H_2O-SiO_2 体系。地质研究,特别是矿物中的包裹体研究的许多证据表明,在范围宽广的各种地质环境中存在的流体是从稀释的水溶液到饱和盐水溶液。地质流体常见有 $H_2O-NaCl-KCl$, $H_2O-NaCl-CaCl_2$ 和 H_2O-CO_2-NaCl 三元体系,前两者可以分解成 $H_2O-NaCl$, H_2O-KCl , $H_2O-CaCl_2$ 二元体系,除 H_2O 以外, $NaCl$ (KCl , $CaCl_2$, $MgCl_2$) 和 CO_2 是其中最主要的组成,因此,这种流

体可以近似地用 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{RCl}$ 体系来表示, R 的位置可以是 Na, K, Ca 和 Mg 等碱金属元素, NaCl, KCl, CaCl_2 , MgCl_2 加入 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系并未改变体系的基本特征, 水溶液中加入 NaCl 等将明显提高体系的临界温度和压力, 即多数天然卤水中溶解盐的影响大于溶解气体的影响, 总的结果是热水溶液的临界曲线(点)向高温高压漂移。

$\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 的体系相关关系的研究新进展有: 高温高压下该体系不混溶和相平衡关系的研究^[11, 12]; Schmidt 等利用人工流体包裹体技术对高温高压含 CO_2 的高浓度 NaCl 水溶液体系的 $P-V-T$ 性质的研究^[13]; Duan 等最近导出的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 体系的状态方程, 可预测高温高压下该体系的 $P-V-T-x$ 不混溶和相平衡, 溶解度和活度等的状态方程^[14]。

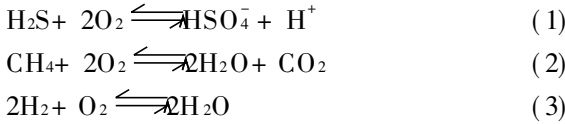
3. 2 高温高压的电解质溶液的特征对矿质的影响

高温高压下, 水的化学性质的变化对电解质溶液的行为有重大的影响。在 > 300 时, 水的自由解离大约是室温的 10^3 倍, 此时的介电常数只是相当于室温时的有机溶液的介电常数。对于强电解质溶液像 NaCl, KCl 等, 随着温度的增加, 不离解的 NaCl 分子变的富集起来, 溶液中存在的不是离子平衡而是分子平衡在溶液中占主导地位^[15]。溶液中的分子包括 NaCl, KCl, HCl, H_2S , SO_2 等单体分子和双体分子(monomeric and dimeric molecules)。此时, 成矿物质如 Au, 常常形成分子作为配位体来迁移, 例如反应:



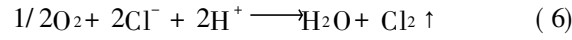
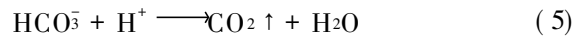
3. 3 气-液相分离与成矿作用

气-液相的分离作用一般发生在由封闭向开放转变的过程中, 自然界的成矿体系多属于此类型, 这对矿床的形成和矿床的分带具有重要意义, 气-液相的分离将会改变溶液的成分和氧逸度, 从而对成矿物质的迁移和沉淀产生影响。其中的反应有:



在成矿溶液沸腾过程的氧化还原反应中, 氧化还原对的反应(1)的挥发份 H_2S 较 CH_4 , CO_2 挥发慢, 因而 $\text{H}_2\text{S}-\text{HSO}_4^-$ 平衡成为控制热液氧逸度的主要反应^[16]。

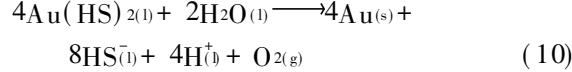
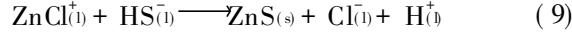
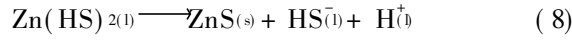
当发生气-液相分离时, 由于 CO_2 , H_2S , Cl_2 的挥发常常使成矿溶液 pH 增加。主要的化学反应有:



以 CO_2 为例, 假定液相-气相分离发生在 250 ~ 245 时约 60%, 50%, 40%, 30%, 20%, 10% 的 CO_2 移入气相, 移出的蒸气量约为整个成矿溶液的质量的 1%, 此时, 反应的化学平衡常数 $K_{250} = K_{245}$, pH 的增加可以公式(7) 计算得到, 其结果为 0. 40, 0. 30, 0. 22, 0. 16, 0. 10, 0. 05。

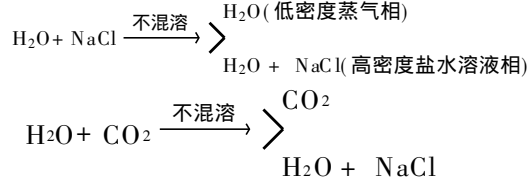
$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_2 - \text{pH}_1 = \log_{10} \left[\frac{m^1(\text{HCO}_3^-)}{m^2(2\text{HCO}_3^-)} \right] \quad (7)$$

以锌、金为例, 在低盐度硫溶液中金属以 HS^- 形成离子团, 在高盐度富氯中金属以 Cl^- 形成离子团。当气相-液分离时, 上述的反应(4), (5), (6) 将向右进行, 成矿溶液中的锌、金将会有(8), (9), (10) 的反应, 这也就充分地解释了含金石英脉中方铅矿和自然金共生的现象,



另外, 在浅成热液矿床的沸腾作用过程中气体逸出时, 矿质的微晶还会吸附到气泡的外表, 通过这种机械的吸附作用处于深部及其侧向的矿物微晶有可能直接被迁移到地壳的浅部而沉积成矿^[17]。

在成矿溶液处于沸腾作用时, 水蒸气的大量挥发, 使得剩余溶液的盐度不断增加, 可能的化学分离有:



第一种情况下, 不混溶分离是浅成热液金矿机制常报道的“沸腾”成矿作用。第二种不混溶分离可能是不少太古代绿岩带金矿形成的重要原因, 在加拿大、澳大利亚等某些太古代绿岩带金矿具有此特征^[18]。

3. 4 成矿流体的成矿专属性

各类矿床的流体包裹体成分较复杂, 主要液相成分 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} 及少量的 Li^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , BO_3^{3-} , PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} , HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 及其他元素, 主要的气体为 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$, CO_2 , 少量的 F, Cl, CH_4 , CO, H_2 , O_2 , N_2 等。金矿床除了具有上述的大部分成分外, 还具有其自身特性。不同类型的矿床将由不同的成矿流体形成, 但他们也不是截

然不同的,如浅成低温热液-夕卡岩型-斑岩型金(铜)矿床的成矿流体在一定的程度上具有一定的过渡性。金矿床的成矿流体中主要阳离子有 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 等,阴离子有 Cl^- , F^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , HS^- , SO_4^{2-} 等。气相成分包括 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$, CO_2 , H_2 , H_2S , NH_3 , CH_4 等,且在不同类型金矿中人们还发现有少量的有机物,在我国西南黔、滇、桂的卡林型金

矿中板其、丫他、戈塘有大量的 CH_4 的发现,板其、丫他、S矿化区、戈塘的 CH_4 气体的摩尔分数为 0.55×10^{-3} , 1.15×10^{-3} , 71.56×10^{-3} , 0.013×10^{-3} ,其中S矿化区的3个样品的包裹体 CH_4 最高,样品S-3中 $x(\text{CH}_4) = 70.10 \times 10^{-3}$,样品S-35中 $x(\text{CH}_4) = 71.56 \times 10^{-3}$,样品S-40中 $x(\text{CH}_4) = 1.48 \times 10^{-3}$ 。

表 1 不同矿床成矿流体的常见性质
Table 1 Properties of several types of Ore-forming fluid

矿床类型	Hg 矿床	浅成热液 Au-Ag 矿床	含有 Ag 的有色金属矿床	斑岩型 Cu,Mo 矿床	金刚石*
盐度/%	< 3?	< 2	2~40	5~60	
可溶性组分	Na, HCO_3 , CO_2 , B, NH_3	Na, HCO_3 , Cl, SiO_2	Na-Ca-Cl	Na-Ca-Cl	CO_2 , H_2O , H_2S , CH_4 , N_2 , Na, K, Cl
H_2O	多来源	天水+ 岩浆?	多来源	岩浆+ 天水	地幔来源
Cl	多来源	岩浆?	多来源	岩浆+ 其他来源?	地幔来源
S	岩浆+ 其他来源?	岩浆?	多来源	岩浆?	地幔来源
C	多来源	岩浆?	岩浆+ 其他来源?	岩浆+ 其他来源?	地幔来源
矿质	变质+ 岩浆?	岩浆?	多来源	岩浆+ 其他来源?	地幔来源
能量来源	岩浆加热和重力	岩浆加热	岩浆加热和重力	岩浆加热	地幔流体+ 重熔作用

* 引自路凤香、郑建平(1999),其他引自 Donald E. White(1974)

4 成矿流体作用动力学

矿床是一个复杂的地质系统,成矿作用是一个复杂的动力作用过程。矿床成因的基本问题是成矿作用的动力学,其核心是成矿作用的发生,即矿化向成矿的转化。成矿动力系统是一个时空复杂系统,目前已认识到了成矿作用普遍具有多期性、多阶段性的重要特征,并提出“多成因矿床”、“沉积-改造矿床”、“叠生矿床”等概念,成矿作用的多期、多阶段正是成矿动力系统在时间演化上的复杂性的表现;矿床在空间上分布的不均匀性、自相似性和多重分形分布特征,以及矿床的分带性等都是成矿动力系统在空间演化上复杂性的表现。根据时空混沌理论和耗散结构理论,成矿作用的发生实质上是成矿的非平衡定态向失稳向有序的转变,成矿动力系统在时空上对成矿的初始条件、边界条件的敏感性、强依赖性无疑会影响成矿作用的区域化、即局部的微小的扰动将以多米诺效应的方式传播并放大而遍及整个系统,因而在相似的地层、构造环境中,有的地区产出大型、超大型矿床,而有的地区却没有或仅有小型

的矿床^[19,20]。

成矿的动力系统由流体及各个组分、岩石及其中的矿物等众多子系统组成,所以它是一个具有高自由度的系统。每个子系统都在一定的条件下表现出非线性,从外部流入的能量不断改变各个子系统的状态,当状态量达到其所能承受的值后,出现非线性的特点。同时,每个子系统之间相互作用。

4.1 成矿流体传输动力学

在地壳浅层多孔介质的传输机制包括:平流、分子扩散、对流,甚至有时还会出现涌流。成矿流体的运移过程中,并不是由上述的一种方式,而是多种方式耦合作用的结果。多孔介质中流体服从达西定律(Darcy Law)计算动力学扩散系数为 D :

$$D = v \cdot \alpha$$

其中 v 为成矿流体的传输速度; α 为单位长度内流体的分散性。

当考虑成矿流体是以那一种方式来传输时,我们需要用无量纲佩克莱特数(Peclet number)来进行判断^[21],

$$Pe = \frac{v \cdot l}{D}$$

其中 D 为分子、水动力学扩散系数, v 为流体传输的速度, l 为研究的流体所迁移的距离。当 $Pe \gg 1$ 时,可

以忽略分子、水动力扩散效应,而认为是平流占主导。例如在大型盆地成油藏循环系统中,在时间小于 1 万年时,由于分子扩散距离的级数为 $n \cdot \text{cm} - n \cdot \text{m}$,所以可忽略掉分子扩散,而简单认为是平流成油。

处于深部的有压快速涌流,采用什么方式来描述是近年来的科学家所探讨的热点。卢焕章(1995)认为仍用达西定律来描述,而一些学者认为达西定律的应用具有明显的限定条件,只适用于雷诺值小于 10 的线性渗流,达西定律所研究的流体的主要阻力来自于粘滞力,流动的速度很小,而深部的有压涌流流体的流动的主要阻力是惯性力,流体的流动状态为非线性流和紊流。张连昌(2001)认为流体的运动方式可以看作是有压管流,其动力学规律可用柏努利方程的基本形式为基础^[4]

对成矿流体沿断裂、裂隙运移的研究中,一是假定成矿流体与上、下盘之间没有化学反应的隔离系统来研究,主要应用双扩散对流理论来研究,二是把流体和上、下盘围岩结合起来,认为断裂当作整个孔隙介质中的一个特殊单元^[22]。於崇文等(1998)^[20]在对云南个旧老厂矿田内陡倾断裂裂隙中电气石-锡石细脉带的流体动力学研究中,认为对流的临界 Rayleigh 数 Ra 为 10^3 数量级,矿床的细脉中, Ra 远小于临界 Ra 值,一般小于 100,成矿流体不产生对流;大脉中成矿流体的 Ra 值超过临界 Ra 值,可能发生对流。周陶发(2001)通过对安徽月山铜、金矿床的成矿流体从深部沿断裂、裂隙及多孔介质(含微裂隙)运移分别引用了不同的速率计算公式计算得出结果为: 1.4 m/s , $9.8 \times 10^{-1} \sim 9.8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, $3.6 \times 10^{-7} \sim 4.6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ^[23]。

成矿流体常具有复杂的化学反应,这将会对流体的传输方式产生影响,20 世纪 90 年代以后,国外的许多学者也曾经对它进行了开创性的研究工作^[24-27]。

4.2 成矿过程中的构造动力学作用

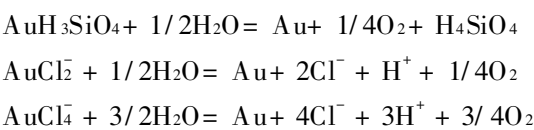
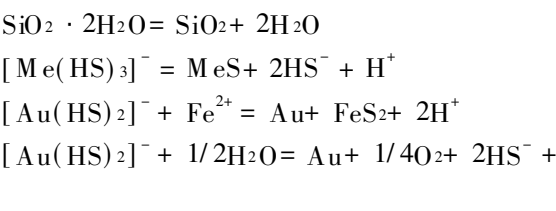
构造成矿动力学的研究主要是对引发构造变形、构造作用发生的动力机理来解释成矿机制。近年来的韧性剪切带的构造动力学研究较多,主要有: Bonemaison(1988, 1990)提出的含金剪切带 3 阶段成矿模式。Kerrich 和 Fyfe(1988)认为脉状金矿是在水压断裂活动期间就位于剪切带中的。Hodgson(1989)总结了 Sigma, Kalor, Red Lake, Gold Mile 等脉金矿床,认为矿脉局限于剪切带内高流体压力所致的扩容积的低压力环境中。Sibson 等(1988)^[31]

提出了与地震断裂的动力效应有关的断裂阀门成矿模式,该模式很好地解释了中、低温浅成热液型矿床定位机制。Sibson(1989)进一步提出了两种水力机制及相关的剪切带金矿化特征,即‘抽吸-扩容’机制及有关的低温热液型金矿,‘断层-阀门’机制及有关的中温热液型金矿。

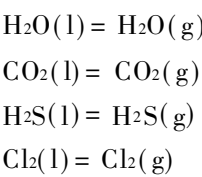
4.3 成矿流体的构造-化学反应耦合动力学

含矿质、挥发分的成矿流体内的化学反应可以分成 3 类,即成矿反应、控制反应,缓冲反应,本文以金矿的形成为例^[29, 30]。

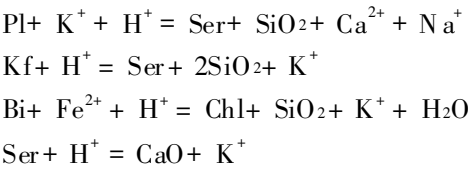
(1) 成矿反应



(2) 控制反应



(3) 缓冲反应



其中: Me= Fe, Pb, Zn, Cu 等, Pl. 斜长石, Kf. 钾长石, Ser. 绢云母, Bi. 黑云母, Chl. 绿泥石, CaO. 高岭石, l. 液相或溶解态, g. 气相。

处于高温高压时, SiO_2 , H_2S , Cl_2 , H_2O , CO_2 等常呈溶解态,此时压力对它们的影响占主导地位,从而使成矿反应向左进行,而在缓冲化学反应中,由于有 CO_2 , H_2S 的溶解使得 pH 偏低,因而反应向左进行,出现了高温阶段的硅化石英脉。当成矿流体迁移到地壳浅部张剪性裂隙中时,在脆性破裂阶段,由于张裂隙的扩容和减压作用,控制化学反应向右进行,发生沸腾作用,使得 pH 升高,成矿反应向右进行,同时石英由于温度、压力的下降晶出,为了使成矿的化学反应进行的更为彻底,缓冲化学反应组将向右进行,使得 H^+ 的浓度减少,而消耗系统中的 H^+ 。上述这一

过程证明了压性构造不利于成矿,相反在浅成热液减压、沸腾时沉淀成矿的现象。

高温高压的成岩成矿实验、地幔喷出岩石中包体研究和金刚石、锆石等高温矿物包裹体微观测试使人们对地幔流体与成矿作用认识更加深入。基于热水溶液地球化学的实验机理,通过经验、半经验模型的计算机模拟,不仅使成矿流体研究的热力学范围扩大,而且获得了更多实验很难观察到的微观信息。成矿热液系统中流体的自然形状、流体的运移方式及机制,金属组分的输运、沉积等成矿流体动力学注重于成矿系统随时间的演化特征。当前,计算机在成矿流体热质输运数值模拟、成矿流体化学质量迁移数值模拟、流体输运-化学反应耦合动力学研究等方面正发挥积极的作用。

参考文献:

- [1] 路凤香,郑建平,陈美华.金刚石的形成与流体的关系[A].裴荣富,翟裕生,张本仁.深部构造作用与成矿[C].北京:地质出版社,1999.115-121.
- [2] 杨玉荣.流体地球科学发展趋势与展望[A].《流体地球化学进展》编委会.流体地球科学进展[C].北京:地震出版社,1999.
- [3] 杜乐天.地幔流体与成矿[A].裴荣富,翟裕生,张本仁.深部构造作用与成矿[C].北京:地质出版社,1999.109-114.
- [4] 张连昌,赵伦山.成矿流体研究的若干进展与动态[J].地质与勘探,2001,37(1):7-10.
- [5] 中国地球物理学会流体地球科学委员会筹委会.我国地幔流体研究现状与展望[A].《流体地球化学进展》编委会.流体地球科学进展[C].北京:地震出版社,1999.15-24.
- [6] 段振豪,吕万军,李思田,等.地质流体热力学性质的计算机模型分子动力学模拟[J].中国科学基金,2000,(2):112-117.
- [7] Brown P E, Lamb W M. Properties of fluid in the system H_2O-CO_2-NaCl : New graphical persentation and implications for fluid inclusion studies[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989, 53(6): 1209-1221.
- [8] Brown P E, Hageman S G. Macflincor its application to fluids in Archean lode-gold deposits[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59(19): 3943-3952.
- [9] 张哲儒.流体的热力学前缘研究[J].地质前缘,1996,3(3-4): 80-88.
- [10] 刘斌,沈昆.流体包裹体热力学[M].北京:地质出版社,1999.
- [11] Frantz., Popp R K, Hoering T C. The compositional limits of fluids immiscibility in the $NaCl-H_2O-CO_2$ system as determined ith the use of synethetic fluid inclusions in comjuction with mass spectrometry[J]. *Chem Geol*, 1992, 98: 237-255.
- [12] Joyce D B. An experimental determination of the thermodynamic properties of H_2O-CO_2-NaCl fluids at hih pressures and temperature[J]. *geochemica et Cosmochimica Acta*, 1995. 57: 733-746.
- [13] Schmidt C, Rosso K M, Bodnar R J. Synethetic fluid inclusion Experimental determination of PVT properties in the system $H_2O+40wt\% NaCl+50mol\% CO_2$ at elevated temperature and pressure [J]. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 3953-3959.
- [14] Duan Z, Moller N, Weark J H. Equation of state for the $NaCl-H_2O-CO_2$ system: prediction of phase equilibria and volumetric properies [J]. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 2869-2882.
- [15] Henley R W. Solubility of gold in hydrothermal chloride solutions[J]. *Chemical Geology*, 1973, 11: 73-87.
- [16] Drummond S E., Ohmoto H. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems [J]. *Economic Geology*, 1985, 80: 126-147.
- [17] 丁武宝.热液在裂隙中沸腾作用和金银矿床的成矿关系[J].矿物岩石,1988,8(1):50-57.
- [18] 张文淮,张志坚,伍刚.成矿流体及成矿机制[J].地质前缘,1996,3(3-4):245-252.
- [19] 谭凯旋,龚革联,龚文君.地质系统的复杂性和非线性地质动力学[J].地质地球化学,1999,27(2):29-32.
- [20] 於崇文,岑参,鲍征宇,等.成矿作用动力学[M].北京:地质出版社,1998.5-6.
- [21] Carll. steefel, Antonio C Lasaga. Putting transport into water-rock interaction models[J]. *Gology*, 1992, 20: 680-684.
- [22] 中国科学院地球化学研究所.高等地球化学[M].北京:科学出版社,1998.152-155.
- [23] 周陶发,刘晓军,袁峰,等.安徽月山矿田成矿流体的迁移速率和规模[J].地质论评,2001,47(2):139-145.
- [24] Rubin. J. Transport of reacting solutes in porous media: Relation between mathematical nature of problem formulation and chemical nature of reaction[J]. *Water Resources Research*, 1983, 19: 1231-1252.
- [25] Walsh M S, Brant S L, Scheter, R. S., *et al.* Precipitation and dissolution of fluid attending flow through porous media [J]. *American Instiute of Chemical Engineering Journal*, 1984, 30: 317-327.
- [26] Lichtner P C. Continuum model for simutaneous chemical reactions and mass transport in hydrothermal systems[J]. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49: 779-800.
- [27] Yeh G T, Tripathi V S. A model for simulating transport of relative multispecies components: model development and demonstration[J]. *Water Resources Research*, 1991, 27: 3075-3094.
- [28] Richerd H Sibon, Francois Robert K, Howard Poulsen. High-angle reverse flults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits[J]. *Geology*, 1988, 16: 551-555.
- [29] 刘玉兰,张桂兰,田军.绿岩中金淋滤作用实验研究[J].地质学报,1992,66(2):362-369.
- [30] 王声远,樊文苓. Au 在 $SiO_2-HCl-H_2O$ 体系中 200 溶解度测定—硅化对金矿化的意义初探[J].矿物学报,1994,14(1):46-55.

THE MATTER AND PROGRESS OF METALLOGENETIC FLUID RESEARCH

LIANG Jun-hong, JIN Cheng-zhu, WANG Jian-guo

(Institute of Resource & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The research of ore-forming fluid includes large-scale translayer effect, mantle metallogenetic process, fluid thermodynamics and dynamics of fluid. The solution properties of high temperature and pressure, gas-liquid phase parting, fluid speciality become keys of thermodynamic research. The research is focused on fluid transport dynamics, tectonic dynamics, chemical coupling.

Key words: large-scale and translayer effective; mantle fluid metallogenetic process; fluid thermodynamics; fluid dynamics

欢迎订阅 2002 年《地质找矿论丛》

《地质找矿论丛》为国家科技部和新闻出版总署批准,由天津地质研究院主办的地学科技期刊,1986 年创刊,国内外公开发行,现为季刊,每期 72 页,A4 国际开本。中国标准刊号:ISSN 1001-1412;CN 12-1131/P。

《地质找矿论丛》是天津市一级期刊、中国科技论文统计源期刊和《中国科学引文数据库》来源期刊,并已成为美国《化学文摘》(CA)收录期刊,期刊全文入编《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和《万方数据系统科技期刊群》,以多种形式为读者服务。

《地质找矿论丛》主要报道矿产成矿理论与成矿预测、物质成分及综合利用、水文地质和工程地质、环境地质调查与治理、资源勘查工程、矿产品深加工技术、地质矿产技术经济等方面的科研成果、进展评介、研究简报,并不断开拓报道领域与深度。

《地质找矿论丛》面向从事地质科研、矿产勘查、矿山企业、矿产品开发工作的科技人员和地学院校的师生。热忱欢迎地矿行业、地学院校、文献信息部门的单位与个人踊跃订阅《地质找矿论丛》。

《地质找矿论丛》每季末月出版,每期订价 5.00 元,全年订价 20.00 元,订户可向本刊编辑部函索订单订阅,订购款一律通过邮局汇寄。也可通过“全国非邮发报刊联合征订服务部”订阅。

《地质找矿论丛》编辑部地址:天津市河西区友谊路 42 号《地质找矿论丛》编辑部;
邮编:300061; 联系电话:022-28367243; 联系人:王书辉

欢迎订阅《有色矿山》

《有色矿山》系国家科委批准向全国公开发行的刊物,是实用性很强的有色金属矿山采、选综和性期刊,其内容与矿山生产、设备应用情况紧密相连,本刊主要报道国内外矿山建设生产和科研成果,介绍国内外矿山采用的新技术、新工艺、新材料、新设备和加强科学管理、提高经济效益、降低能耗等经验,在各有色矿山、黄金矿山及其他企业本刊物有很大的影响。

本刊为双月刊,单月 15 日出版。2002 年将改为大 16 开本,每年 6 期,每期定价 8.00 元,全年 48.00 元。订阅者可向编辑部索取订单,或直接由邮局汇款到编辑部订阅。

本刊还可刊登广告,价格从优。

联系地址:北京市复兴路 12 号《有色矿山》编辑部
邮 编:100038
联系电话:(010)63962233—3218
传真:(010)63963662(请注明《有色矿山》)