

浅谈地质流体及成矿作用的研究

许典葵

摘要:地质流体是一定地质作用的产物,而矿床的形成过程与特定地质构造背景下地质流体的产生、运移和聚集有着密切联系。不同成矿流体的成矿机制各有差异。岩浆热液因温度降低、压力减小等因素使热液中成矿物质达到过饱和,从而产生矿质沉淀;沉积盆地含矿热卤水流体在热对流、沉积压实等作用下运移、充填、聚集;与海底基性火山活动有关的现代大洋海底热液形成硫化物矿床;地幔流体的碱交代作用形成大型-超大型中高温热液矿床。在具体的成矿过程中,各种构造环境又对流体中的成矿元素的分配、集中起到至关重要的控制作用。

关键词:流体性质;成矿作用;成矿机制;超临界流体;构造-流体-成矿作用

地质流体在各种成矿作用中都起到重要的媒介作用。Fyfe 等人在其所著的《地壳中的流体》一书中,对上个世纪 70 年代以前有关流体地质作用研究的成果作了较为系统的总结。上世纪 80 年代以后对地质流体研究更为深入。1992 年美国地球物理学会出版的《地球物理学研究》系列报告中包括的《地壳过程中流体的作用》,对地质流体的研究成果及发展趋势作了系统而深入的总结和分析。本文旨在论述地质流体在成矿过程中的作用机制、研究进展和趋势。

1 地质流体的性质

地质流体是在一定的地质环境中形成的地质产物,其形成主要与各种地质作用有关。而成矿流体是地质自然流体在特定地质环境中经过特定的演化阶段形成的特征产物,是富含挥发份、卤素及不相容碱金属、碱土金属元素的流体溶液。但在不同成矿流体中其溶质种类及其含量是有区别的。因此,成矿流体是自然流体在一定地质作用中形成的特殊流体溶液。

归纳地质流体的来源主要有:岩浆上升过程中因分异或结晶释放的流体;大气降水循环演化产生的流体;富水沉积物由于构造收缩或挤压产生的流体;变质过程中脱水-脱挥发份产生的流体;地幔排气作用产生的流体。

对于不同来源的流体在活动、演化过程中的驱动力主要有:不同部位的应力差、压力差、重力梯度及流体密度差导致成矿流体运移;地壳热结构的改变或沉积压实作用促使流体循环,并造成围岩-流体反应;因造山期间的构造挤压和地热抬升,驱动深部流体大规模的运移;地质过程中产生出新流体引起的流动作用。地质自然流体在不同驱动力作用下发生运移,与源岩或围岩发生相互作用,使成矿金属元素活化、溶解、组合,形成富含矿质的成矿流体。

对于几乎所有的金属矿床类型来说,其形成过程均与金属从源岩活化、原始渗滤、矿质运移和沉淀富集有着密切的关系,而上述这些过程主要是由成矿流体的运移以及与围岩发生化学反应完成的。流体是地球深部最重要的热载体和热传递媒介,是岩石的软化剂和熔剂,能强烈破坏邻近岩石。流体的渗滤和扩散可以导致水-岩反应,甚至产生水致断裂和角砾岩带等非应力形成的构造,而这些构造又是吸取和搬运成矿物质的主要通道,使得成矿物质由分散到浓集,当流体的性质及周围环境改变时,成矿流体中的矿物质沉淀、堆积,形成矿床。其中关键的是成矿流体中矿物质的沉淀机制,不仅仅因为温度降低或压力减小而导致矿质沉淀,围岩蚀变、缓冲效应、流体收缩作用以及沸腾作用等多因素也都制约着矿质沉淀。

2 地质流体与成矿机制

以下讨论几种主要的成矿流体,如岩浆热液、沉积盆地流体、现代大洋海底热液、变质流体以及超临界流体的性质特点和各自的成矿机制。

2.1 岩浆热液和成矿机制

岩浆热液是由岩浆或硅酸盐熔体在其结晶分异过程中形成的流体,是与岩浆作用有关的热液。一种是从岩浆直接分异出的热液,其组成主要为岩浆喷发-火山作用中的气体成分以及岩浆包裹体中的挥发份。另外一种则是岩浆流体与地下水混合的地热体系热液。对于岩浆热液来说,压力范围主要为 100~200MPa,其相应的深度不会超过地下 7~8km,温度范围在 400~800℃,其成分主要属于 H₂O-NaCl-SiO₂-CO₂ 体系。因为岩浆流体和地下水是岩浆热液的主要来源,所以热液流动的动力可分为两大类:源区流体与周围流体的压力差形成定向流动以及流体密度差形成的自然对流。

对于不同的热液矿床,造成其成矿物质沉淀的因素可归结为 4 个主要因素,即:

(1) 温度降低。因为不同的成矿元素在热液中具有不同的饱和温度,在成矿流体从岩体往外运移过程中,伴随着温度的下降,先达到饱和的元素先沉淀,形成近岩体矿化;后达到饱和的元素后沉淀,形成远岩体矿化。成矿元素在什么温度下达到饱和,取决于该元素在热液中的初始浓度及温度-饱和浓度之间的关系。

(2) 压力减小。它使成矿物质产生沉淀的影响主要是通过流体相分离产生的,压力降低到一定值时,流体由原来的单相(液相)变为两相(液相+气相),大量酸性组分的带走(到气相中)使液相的 pH 值增大,当流体相分离发展到气相和液相的体积近于相同时,成矿物质发生大量沉淀。

(3) 热液与围岩化学反应。其结果势必改变流体的化学成分,既可能增大成矿元素的溶解度而使它们从围岩中萃取出来,也可能降低成矿元素的溶解度而使它们沉淀,这需要视具体的物理化学条件而定。

(4) 流体混合。岩浆流体与地下水的混合是不可避免的,地下水的掺合可导致岩浆流体的温度下降,盐度降低,pH 值升高,从而促进矿质沉淀。其实上述这四种因素的共同特点都是通过改变成矿热液的物理化学条件(t, p, Eh, pH 及成矿元素的浓度等),使热液中成矿元素达到过饱和从而产生矿质沉淀。由于成矿过程的长期性、复杂性,因此岩浆热液矿床的形成是多因素共同作用的过程。

2.2 沉积盆地流体及其成矿机制

大多数沉积盆地体积的 20% 左右都是流体,而且绝大多数的流体是热的、咸的,并且处在相对高压状态下,其化学组成与地表条件下形成的水差别很大。在盆地中存在许多水,统称为地层水。地层水按其盐度或所溶解的物质不同可分为淡水、咸水、盐水和卤水,而成矿的盆地卤水中所溶的物质(TDS)均超过 1×10⁶mg/L。

沉积盆地中的流体运移一般是从热动力学和化学位高的地区向低的地区流动,除此之外,其运移还与岩石的孔隙度、渗透率、热导率等性质以及盆地的演化过程密切相关。一般的大气降水可以到达地下几至十几公里深处。渗入盆地深处的水体,由于地热增温、岩浆作用、构造作用及地幔热源的影响,从而形成热水流体。这些热水流体在运移过程中又与围岩发生水-岩反应,活

化围岩中的物质成分,形成富含各种金属元素的盆地热卤水流体。此外,由于沉积盆地中富含大量的有机质,通过压实热解作用使其加入到成矿流体中,这更有利于溶解围岩中的成矿物质,为盆地热水有机成矿提供了有利条件。含矿热卤水流体在热对流、沉积压实及构造作用下,在盆地中产生区域环流,不断溶解围岩中的成矿物质,沿着层间裂隙或盆地边缘的断裂构造,向边侧或上层运移、充填、堆积,形成大型的层控金属矿床。

2.3 变质流体与成矿机制

变质流体是由矿物在变质过程中因脱水作用或去挥发份作用而生成的。从成份上来说,主要是 H_2O-CO_2 型流体,其盐度一般小于 3wt%NaCl。在低变质岩相中产生的流体富含 H_2O ,而在高变质岩相中产生的流体则以 CO_2 为主。变质流体的成分除取决于变质程度外,还受与流体处于平衡的原岩成份的控制。

变质流体不仅在变质过程中对不同变质相带矿物组合的形成起着重要作用,而且促使原沉积岩中金属元素产生活化转移、富集成矿。许多矿床的形成与变质流体作用有着密切关系。含矿变质流体沿断裂裂隙上升,由于温度、压力的变化而发生相分离,从而导致某些矿物沉淀,形成含矿脉体或交代矿床。目前,对于变质流体的了解主要是研究矿物中的包裹体,测定不同类型包裹体的盐度、密度、组分、温度和压力,以揭示变质作用过程中流体的形成、演化。由于变质过程的复杂性,包裹体在此期间是否遭受破坏,能否真实地反映成矿流体的性质,在进行变质岩中的包裹体研究时,尤其强调变质矿物研究与流体包裹体测试资料的配合分析。

2.4 超临界流体

超临界流体是指处于临界温度(T_c)、临界压力(P_c)和临界密度(ρ_c)之上的流体,是一种可压缩的高密度流体,其分子间力很小,类似气体,但密度很大,接近液体,是气液不分、没有相界面的流体,因而也没有相际效应,其溶解、萃取能力较非超临界流体大大提高。超临界流体的粘度、扩散系数分别是液体的 1% 和 100 倍,具有良好的传导特性。尤其在临界点附近,温度和压力的微小变化就会引起流体密度发生很大的变化。

在超临界水体系中,由于 H_2O 的介电常数很小以及 NaCl 溶解度的降低, H_2O 中的 OH^- 以及 $NaCl_2^-$ 、 Na_2Cl^+ 等都可以与金属离子形成聚集体并迁移,超临界水体系在临界点附近由于温度、压力的变化,引起流体体系的密度、粘度、扩散系数等物理性质也发生变化,这一点可能是成矿物质堆积的原因。另外,临界点附近物化能的改变,导致成矿元素迁移失去必要的动力条件,而发生大规模的沉淀和富集。

目前,根据地球内部温度和压力的估算结果,地壳深部流体及地幔流体均处于超临界态。研究流体包裹体是认识深部流体的重要方法和途径。大量的对地幔流体的研究结果揭示出,地幔流体的成分以 H_2O 和 CO_2 为主,并含有少量的 CO 、 H_2 、 F 、 Cl 、 H_2S 等挥发份以及一些常量、微量元素和熔体。地幔流体主要来源于俯冲板块的脱水、脱气作用以及地核、地幔脱气作用,具有独特的溶解和输运能力。其成矿作用主要表现为本身成矿,并能提供成矿物质、成矿流体,提供碱质和硅质,以及提供热源或成矿热动力。成矿作用的主要特征表现为矿床具有深大断裂构造背景,伴随幔源岩浆活动,成矿物质和成矿流体具有幔源性,一般为中高温热液矿床,而且往往形成大型-超大型矿床和矿集区。因为流体的形成、运移环境不同,以及各种流体的成矿机制有所差异。实际上,每个具体的矿床不是单单依靠某一种流体的运移、沉积形成的,有时矿床具有多种流体、多期次叠加的成因。

3 构造 - 流体 - 成矿作用

上面分别讨论了不同类型的流体特征及其成矿机制,而在具体的成矿过程中,构造对成矿起着至关重要的作用。成矿物质由分散到富集并形成矿床的过程受多种地质因素控制,其

中,构造和流体起了重要的作用。从构造与流体的相互关系看,在成矿过程中,构造是控制一定区域中各地质体间耦合关系的主导因素,是驱动流体运移的主要动力。各种构造形迹如断层、裂隙、角砾岩带等为地球内部流体的运移提供通道,其扩容空间是含矿流体大量停积和沉淀出矿石的场地。同时,构造应力对岩石的力学、物理性质也发生影响,从而影响流体在岩石中的流动状态、速率和水 - 岩作用过程。

俯冲带作为流体活跃的场所一直备受关注。俯冲带内流体流动受岩石渗透性、俯冲速率、俯冲带热结构及流体性质以及地球化学众多因素的影响。大陆地壳在俯冲过程中,随着变质程度的升高,部分含水矿物相继分解,会有流体释放出来。当俯冲深度为 40~50km 时,俯冲陆壳岩石中大量低级变质含水矿物(如绿泥石、绿帘石、阳起石)会脱水,并从俯冲陆壳逸出,形成大规模流体流。在俯冲深度为 50~100km 时,变镁铁质岩石中的角闪石分解并释放出水,由于变镁铁质岩石在陆壳中所占比例较少,因此,这一阶段释放的水不能形成大规模的流体流。但形成局部循环,并加速变镁铁质岩石及其互层或邻近围岩的变质反应。在俯冲深度 >100km 的超高压变质阶段,仅有少量的含水矿物分解。这时俯冲陆壳内只可能有少量粒间水存在,导致俯冲陆壳与周围的软流圈地幔不能发生充分的相互作用。俯冲带作为矿物质堆积、交换以及地球化学分馏的重要场所,加之流体对俯冲带地球化学特征演化的重要作用,使其成为重要的成矿构造环境。

剪切带是构造 - 流体活动的另一种重要的表现形式。深层次的韧性剪切带中形成的原生富气相的变质流体,随着流体向上运移,在脆性剪切带中,即过渡带,岩浆流体改造并稀释变质流体,形成以岩浆流体为主的混合成矿流体。在脆性剪切带中,碎裂岩、角砾岩带构建出明显的减压空间域,深部成矿流体则向低压区扩散、渗透,甚至涌入,并发生与地壳浅部地下水的混合,流体与围岩的交代反应,是成矿的最活跃时期。在剪切带中,成矿主要与脆性变形有关,其中剪切带过渡带,即韧性剪切变形向脆性剪切变形转变至关重要。目前研究比较多的是剪切带中流体与金矿成矿作用的关系,形成的金矿类型为热液型含金多金属矿,蚀变岩型金矿和石英脉型金矿。

在整个的成矿作用过程中,构造和流体是相互作用的控矿因素。构造在总体上对流体的运移起着控制作用;而在特定的空间、时间条件下,流体又表现为十分活跃的地球物质,对构造作用发生物理和化学效应,其强大的能量可突破构造的束缚和局限,并产出新的构造形式。总之,构造和流体的相互作用控制着成矿物质的运移和富集状态。

4 结语

通过根据流体演化与成矿关系,确定成矿过程,是地质流体研究应用的一个重要方向。由于目前的实验条件限制,对于超临界状态下以及变质作用下的含流体体系了解有限。地质流体的研究已成为当前地球科学研究的学科前沿,就成矿流体来说,是地质流体经特殊地质作用形成的,它的运移及成矿与地壳浅部及深部构造系统有密切的关系。因此,开展多学科综合系统地研究是地质流体的一个研究方向。

参考文献

- [1]张德会,龚庆杰.初论元素富集成矿的地球化学机理 - 以岩浆热液矿床的形成为例[J.地质地球化学,2001,29(3):8214.
- [2]向才富,胡建武.右江盆地流体运移过程中成矿与成藏作用[J.地球学报,2003,24(5):4232428.
- [3]刘伟,张玲,赵百胜,等.超临界成矿流体研究及其展望[J.矿产与地质,2003,17(6):663668.
- [4]翟裕生.关于构造 - 流体 - 成矿作用研究的几个问题[J.地学前缘,1996,3(4):2302236.

(作者单位:广东省有色金属地质勘查局九三五队)