

成矿流体研究的若干进展与动态

张连昌¹, 赵伦山²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

[摘要] 近年成矿流体研究在大规模流体的存在与运移、巨型矿床与流体的关系、成矿流体输运动力学、建立热液成矿反应体系及成矿流体成分测试技术等方面取得了重要进展; 今后成矿流体研究在流体的运移路径与成矿预测、超临界流体与金属矿产巨量堆积的关系及成矿流体的计算机模拟等方面走势明显。

[关键词] 成矿流体 超临界流体 有压涌流 成矿反应体系 巨型矿床

[中图分类号] P611 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2001)01-0007-04

Fyfe 等(1978)所著的《地壳中的流体》一书, 系统总结了 80 年代以前有关流体地质作用研究的成果。80 年代以后, 对地质流体的研究更加深入, 内容涉及构造作用中的地质流体、造山带中的流体作用、区域变质作用中的流体动力学、水-岩反应等。90 年代以来, 人们对俯冲带、剪切带中的流体作用、盆地流体、海底及大陆热泉、成矿流体、油气的形成及运移、火山活动及地震等进行了大量研究, 尤其是对地质流体运移过程及动力学的研究推动了该领域的深化。

1 地壳中大规模流体的存在及运移

借助于现代科学技术和手段, 近年来获得了过去无法得到的有关地球科学的大量观测资料, 从而大大地改变了人们对地球物质运动规律的认识。就地质流体运动来说, 如前苏联科拉半岛和德国 KTB 等大陆超深钻探的资料证明, 在地下深处 9 km ~ 12 km 处存在多层构造断裂和破碎带, 其中充满了高温流体, 裂隙的渗透率和地下水涌水量未见减弱的趋势, 据此人们推测大气降水至少可以渗透到地下深处 10 km ~ 15 km。自 1977 年阿尔文号潜水艇在东太平洋 Galapagos 海域 5000 m 深海底扩张中心发现了热卤水喷发现象后, 在世界多处大洋中脊地区观察到海底热泉活动, 实测热水涌水量可达 75 kg/s (Can and Strens, 1989)。美国加利福尼亚州沿圣安德列斯断裂带上升泉涌水量为 3 L/s ~ 10 L/s (Kharaka Y K et al, 1998)。我国福建漳州地热系统形成的自流盆地, 在两组断裂的交汇部位自流井单井涌水量可达 500 m³/d ~ 1500 m³/d, 水温可达 120 (汪集扬, 1996)。在 1978 年河北唐山发生 7.8 级地

震期间, 开滦煤矿井下涌水量达 80 m³/min, 而此前几十年观测的涌水量仅为 20 m³/min ~ 30 m³/min (万迪, 1993), 说明地震泵吸现象对地下水的活动有明显地影响。Carven G (1995, 1997) 在总结了各种地质构造环境中沉积盆地地下水长距离迁移流动特征时指出, 在大陆边缘带由于沉降成岩作用使用隙水析出上侵的最大渗流速率为 0.1 cm/a ~ 1 cm/a, 而由地震泵吸作用驱动深部流体沿构造裂隙上侵的最大流速 > 10 km/a, 二者相差达 10⁶ 倍。此外, 还有多种过渡状态的流动形式和流速。Sibson R H (1998) 认为只有受区域构造驱动的承压地质流体, 才能产生快速大规模的流动。

基于上述资料, 我们认为在地壳深部存在一个宏大的循环流体系统, 热流体在大区域范围内是连通的, 构成地球物质和能量的良好的传递介质。流体的运动主要受构造和热力驱动, 由于构造裂隙系统的连通性, 在局部地段的某一时候可形成较大的流速, 并在横向和纵向上产生长距离的迁移。

2 巨型矿床与成矿流体

Ord A (1999) 认为巨型矿床 (giant deposit) 是地壳规模流体流动系统中的产物, 该系统存在于中到下地壳中的流体库被涌流到 (discharged into) 中上地壳中成矿。促使流体大规模运移的机制, 可能是静岩压力、由孔隙波所维持的高的流体通量及因化学反应产生的孔隙与变形作用的偶合。邓晋福、莫宣学等 (1999) 认为巨量金属堆积需要一个巨大的岩浆-流体成矿系统来供给和支持, 把流体经过的地区叫做流体流域, 好比河流流域一样。巨型矿集区

[收稿日期] 2000-11-20; [修定日期] 2000-12-01; [责任编辑] 曲丽莉。

[基金项目] 中国科学院创新工程项目 (KZCX1-Y-03-01) 和“九五”重大黄金项目 (KZ951-A1-404-02) 资助。

应位于巨大的流体流域之中。毛景文(1999)认为大规模成矿必须有巨量的物质补给、能量的持续供给及优越的物质传输系统和罕见的卸载及储存环境。

越来越多的证据表明,许多大型超大型矿床的形成是地壳大规模流体流动的结果。如江南地区中—低温热液矿床的形成(马东升,1997),美国密西西比河谷型铅锌矿床的形成和分布与盆地内大规模流体的流动有关,卡林型金矿产于以沉积岩为主的地体中,是地壳拉伸作用导致区域流体发生循环的结果(Rober 等,1997)。

Philips G N 等(1998)通过对澳大利亚 Kalgoorlie 巨型金矿床的形成因素研究后认为,形成巨型矿床应有优越的成矿系统,该成矿系统包括 6 大因素:高的热流、大规模流体库、主构造通道、有效的流体聚集及范围大而有利成矿的容矿岩石。即大规模流体的存在是巨型矿床形成的必要条件。

也有资料表明,地幔流体和地幔交代作用的存在对一些大型矿床的形成产生影响。最近,曹荣龙(1994)研究认为,内蒙古白云鄂博矿是一个国内外罕见的地幔流体交代矿床,新疆旦旦布拉克超大型蛭石矿是地幔流体交代成因的非金属矿。国外也有人提出,澳大利亚的奥林匹克坝 U - Cu - Au - REE 矿床与地幔柱有关,南美的 Sn 矿带与大陆热点有关。

3 成矿流体输运动力学

3.1 成矿流体运移研究的基本问题

成矿流体是具有高温高压、含有一定盐度和矿质的高能量热流体,因而具有很强的活动性。研究表面,地质流体的运移一般以流动、扩散和渗流等方式进行,也常常出现涌流。实际上,流体的运移往往是一种方式为主、几种方式共存,并伴随复杂的地球化学反应。控制成矿流体运移方式和驱动成矿流体运移的动力因素是流体自身的性质(热力学条件),如温度、压力、Eh、pH、盐度、密度、成分、不混溶作用等(M Person and G A Carven,1994);环境(动力学条件),如渗透性、地热系统、构造应力、流体通道宽度等;流体 - 环境相互作用,如流体混合、沸腾作用、水 - 岩反应等(D. Craw,1992;D. W. Haynes 等,1995)。

成矿流体运移的方向性是动力驱动流体运移的体现。介质的渗透性、运移通道的规模、地热梯度和应力梯度的方向决定了流体的运移方向和过程;流体的热力学和动力学状态决定着流体的演化趋势;流体运移和演化方向的突然改变可能预示成矿作用的发生。流体的运移和演化遵循一定规律,这种规

律是流体力学、地质地球化学等综合作用的结果。

3.2 成矿流体运移的动力学状态

热液在不同的构造环境,受不同的驱动力运移,便形成不同的流动状态。赵伦山等(1995)通过对胶东几个典型金矿床的观察将热液流体的运动状态区分为两种基本类型:即沿多孔介质和构造破碎带微裂隙的缓慢渗流和沿较宽大断裂裂隙的有压涌流。前者如构造蚀变岩型(或细脉浸染型)热液成矿作用,热液脉旁原生晕的形成,其成矿流体的运移属于渗流;后者如断裂裂隙中脉状矿床的热液成矿作用,导矿构造中热液的上侵运动等。

3.3 成矿流体有压涌流的动力学研究

对于地壳浅部多孔介质条件下的渗流,流体的运移规律基本服从达西定律;那么,对于地下深处流体的有压快速流动(涌流),采用什么形式的动力学方法进行描述是近年科学家探讨的热点问题。卢焕章等(1995)认为仍可用达西定律来描述;而一些学者认为达西定律的应用有明确的限定条件,即适用于雷诺值小于 10 的线性渗流,依达西实验,稳定的层流状渗流只出现在孔隙直径小于 0.5 mm 的多孔介质中,其流体流动的阻力主要是粘滞力,流动速度很小;随着流动通道孔隙度的增大和流体流速的增大,流体流动的主要阻力转变为惯性力,即流体的重力和动力势为不可忽略的因素,流体的流动状态变为非线性层流或紊流,达西定律不适用。对于后者不同学者(於崇文等,1994;赵伦山等,1994;徐献中,1992;Ferry J M, Dipple G M, 1992;Furbish D J, 1997;孙雄等,1998)有不同的研究思路和流体动力学方法。本文认为可以把赋存于地壳深部断裂裂隙中、受构造应力驱动的地质流体的运动方式,近似看作流体力学中的有压管流,其动力学规律可以柏努利方程的基本形式为基础,结合地深流体实际和构造应力的影响加以推导变换的形式来描述。

热液流体的构造泵吸上侵动力学研究已成为许多学者关注的热点(Sibson,1989,1998;Carven,1995;Harward,1999;卢焕章等,1995,1997等),并且这项研究在不断深入,以柏努利方程为基本理论依据的研究,已被应用于石油和地热开发工程中(徐献中,1992;Fubish D J, 1997;孙雄,洪汉净,马宗晋,1998)。

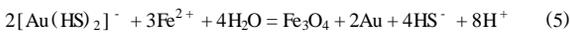
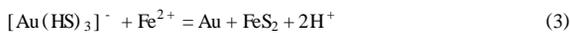
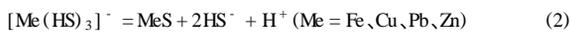
作者对东天山康古尔塔格金矿带成矿地质地球化学动力学进行了研究(张连昌,1999),对岩浆热液和火山热液石英脉型金矿、热液隐爆角砾岩型金矿等探索应用变换后的柏努利方程,进行成矿流体构造泵吸上侵涌流(管流)速率的计算和流速场的计算机模拟,

并应用于成矿预测,实践检验表明已取得了初步成效。

4 成矿热液反应动力学体系

热液矿床的形成是热液体系在特殊条件下与围岩的物质和能量交换作用的结果。赵伦山等(1994)根据实际观察矿区矿石矿物和脉石矿物组合、围岩蚀变特征以及矿物包裹体类型及成分,列出一些主导的化学反应方程,这些代表性化学反应共存的体系就叫做成矿反应体系。张连昌、赵伦山等(1998)将东天山康古尔金矿热液成矿反应体系划分为成矿反应、控制反应和缓冲控制反应三类:

(1) 成矿反应(aq 表示溶解态,l 表示液相,g 表示气相,下同)



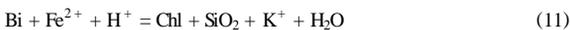
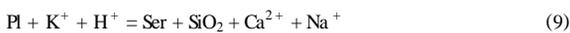
成矿流体中 Au 及其他成矿金属元素主要以 HS⁻ 的络合物 [Au(HS)₃]⁻ 形式存在。络合物在一定条件下分解沉淀出金、硫化物、磁铁矿,这就是成矿反应体系中的成矿反应。

(2) 控制反应



这组反应是体系流体相的相平衡反应,是根据沸腾包裹体中气-液相成分的相转变关系建立的。由于相转变,主要取决于外界温度、压力、构造空间条件,而这些条件也是成矿的控制因素,同时这些气相组分平衡转化又显著地改变热液体系的物理化学条件,并导致矿质沉淀,所以流体相的状态转变反应就成为整个体系的成矿控制反应。

(3) 缓冲控制反应



式中 Pl—斜长石、Kf—钾长石、Ser—绢云母、Bi—黑云母、Chl—绿泥石。缓冲控制反应是根据围岩蚀变反应而建立的。在成矿反应体系中的主要作用是消除第(1)组成矿反应产生的 H⁺,使围岩发生蚀变,继而使成矿反应得以持续进行。

上述 12 组化学反应是康古尔金矿成矿反应体系中的主导反应式,当成矿流体处于不同构造环境

时,这些反应式表现出不同的反应性质和强度,因而影响成矿物质的迁移和沉淀。赵伦山(1996)认为富金矿石的形成是矿液的热力学分异演化与容矿断裂活动的动力学条件有利匹配的结果,也叫偶合成矿作用。

5 成矿流体成分测试技术

成矿流体成分测试技术近十年来取得了重大进展。J. Irwin 改进的激光探针惰性气体质谱仪测定方法,可用于测定包裹体中 Ar、Kr、Xe 同位素,同时可分析单个包裹体的 Ca、Cl、K、Br、I、Se、Ba + Te 和 U; Ghazi 等利用等离子质谱仪测定包裹体中的稀土元素,并用于解释流体运移的路径。电子显微探针(EPMA)技术得到了迅速发展,可用于流体包裹体的成分测定和子矿物的鉴定。Semenko(1992)借助 EPMA 和扫描电镜(SEM)研究了自然金的包裹体,检测出包裹体壁上沉淀有 Fe、Mg、Mn、Ca、K、Na、Cl 等组分。激光拉曼显微探针技术(LRM)近十年来主要用于多元素气体的鉴定和定量分析,以及热液中低温固态水合物的测定(Harris T N, 1993)。质子显微探针(PIXE)在测定微量重金属元素方面取得了进展,适合于测定原子序数大于 30 的元素。Roedder(1992)测定了 10 个包裹体中的金属元素,分析灵敏度可达百万分之一。扫描电镜分析(SEM)集中了透射电镜(TEM)和电子探针(EPMA)能穿透被测样品表面的优点,目前已成为分析子矿物的标准方法。叶荣、赵伦山等(1999)利用扫描隧道显微镜(STIM)对金属硫化物微形貌特征进行观察研究,并为金属矿物在热液介质中结晶沉淀的热力学和动力学条件提供信息。

6 成矿流体研究动态

6.1 成矿流体运移路径与成矿预测

未来要重点研究热液体系中流体库的自然性状,流体的运移方式及机制,金属组分的输运、沉淀机制等(Ord A, 1999)。通过流体包裹体物理化学条件和同位素示踪研究,捕捉流体运移演化的标志,确定流体运移的通道,并将成矿流体动力学、流体演化的非线性过程及地球化学自组织理论与局部地质热异常结合起来,恢复、再造和反演古流体系统,进而查明成矿流体的运移演化过程。根据流体的运移演化与成矿的关系,确定成矿过程,并进行成矿预测。

6.2 超临界流体与成矿

各种矿物在超临界溶液中的溶解度实验研究和理论计算在新世纪是一个重要的研究课题。但目前我们对于许多成岩成矿矿物在超临界温度和压力条

件下的溶解度作为温度、压力和流体成分的函数了解很有限。超临界状态下矿物溶解度的理论计算和溶解度实验研究是获得矿物在高温高压条件下的溶解度或矿物在特定的地质环境中的溶解度的重要方法,是揭示溶解度与体现温度、压力和溶液成分之间函数关系的新途径。

超临界流体对于成矿具有十分重要的意义。涂光炽认为有的矿产超常堆积可能与超临界流体的活动有关。如智利一斑岩铜矿床铜的储量达 6000 多万吨,这一巨量的金属堆积并非由漫长的地质过程完成,可能是由一种强有力的流体-超临界流体一次性搬运完成的。有的矿区具有强烈的蚀变,也非弱溶液与围岩反应的结果,可能是超临界流体-岩石蚀变反应的产物。所以涂光炽教授建议今后应开展地热、地球化学和矿床地质之间交叉学科的攻关,加强超临界流体与巨型矿床关系的研究。

6.3 流体研究的计算机模拟

计算机模拟是流体研究的趋势。过去的实验方法多受客观条件、时间和经费的限制,实验所获得的数据非常有限。计算机模拟的优点是能够完成实验室很难或不可能进行的研究,能够提供实验很难观察测量的微观信息。目前,计算机在成矿流体热质运输数值模拟、成矿流体化学质量迁移数值模拟、及流体输运-化学反应耦合动力学研究等方面正发挥积极的作用。

冯建忠博士提供了部分资料和帮助,成文后经沈远超研究员审阅,在此表示衷心地感谢。

[参考文献]

- [1] Fyfe W S, Price N J, Thompson A B. Fluid in the Earth's crust [M]. Elsevier Scientific Publishing Company. New York 1978: 1 ~ 365
- [2] 於崇文,岑况,鲍征宇,等.成矿作用动力学[M].北京:地质出版社,1998,1~230.
- [3] 闻德荪,魏亚东,李兆年,等.工程流体力学[M].北京:高等教育出版社,1996,187~220.
- [4] Garven G, Raffensperger J. Hydrogeology and geochemistry of ore genesis in sedimentary basins[A]. In: Geochemistry of Hydrothermal Ore

- Deposits. Edited by Hubert L B, New York, 1997, 125 ~ 289.
- [5] Garven G, Bull S W. Fluid flow modeling of the Hyc ore system, McArthur Basin, Australia [A]. In: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. Edited by Hubert L B, New York, 1997, 1, 849 ~ 852.
- [6] Ord A, Walshe J L, Hobb B E. Geodynamics and giant ore deposits [A]. Mineral Deposits: Processes to Processing, Stanley et al, Balkema Rotterdam, 1999, 1341 ~ 1344.
- [7] Neumayr P, Hagemann S G. Plumbing systems, hydrothermal fluids and mineralization [A]. Mineral Deposits: Processes to Processing, Stanley et al, Balkema Rotterdam, 1999, 71 ~ 74.
- [8] Sibson R H. Condition for rapid large - volume flow. Water Rock Interaction (WRI - 9) [M]. Edited by Grig B A et al. A A Balterdam, 1998, 35 ~ 39.
- [9] Dipple G M, Ferry J M. Metasomatism and fluid flow in ductile fault zones [J]. Contrib. Mineral. Petrol. 1992, 112: 149 ~ 164.
- [10] Ferry J M, Dipple G M. Fluid flow, mineral reactions, and metasomatism. [J] Geology. 1991: 211 ~ 214.
- [11] Philips G N, Groves D, Kerrich R. Factors in the formation of the giant Kalgorite gold deposit [J]. Ore Geology Reviews. 1998, 10(3 - 6): 295 ~ 317.
- [12] 拉萨格 A C,柯克帕特里克 R J.地球化学过程动力学[M].北京:科学出版社,1989,1~253.
- [13] 汪集扬.中低温对流型地热系统[J].地学前缘,1996,3(3):96~103.
- [14] 赵伦山,岑况,叶荣.热液流体泵吸上侵管流动力学模拟及其预测意义[J].地学前缘,2000,7(1-2).
- [15] 赵伦山,等.胶东金矿成矿构造地球化学动力学[J].现代地质,1996,10(2):219~221.
- [16] 叶荣,赵伦山,马生,等.扫描隧道显微镜对黄铁矿表面微形貌的研究及动力学意义[J].科学通报,1999,44(11):1220~1221.
- [17] 张连昌,姬金生,曾章仁,等.康古尔金矿成矿反应体系的动力学控制[J].西安工程学院学报,1998,20(2):9~14.
- [18] 张连昌.东天山康古尔塔格金矿带成矿地质地球化学动力学研究与预测[D].博士学位论文,中国地质大学(北京),1999,1~64.
- [19] 卢焕章,池国祥,王中钢.典型金矿床的成因及构造环境[M].北京:地质出版社,1995,128~153.
- [20] 马东升.地壳中大规模流体迁移的成矿现象和地球化学示踪-以江南地区中-低温热液矿床的地球化学研究为例[J].南京大学学报,1997,33:1~10.

SOME ADVANCES AND TRENDS IN ORE - FORMING FLUID RESEARCH

ZHANG Lian - chang, ZHAO Lun - shan

Abstract: In recently years, the study of ore - forming fluid has achieved some important advances in many ways, such as store and movement of large scale ore - forming fluid, the relationship between giant ore deposit and fluid, the transported dynamics of ore - forming fluid, hydrothermal ore - forming reaction systems, determinative method of fluid composition and so on. The study of ore - forming fluid shows remarkable trends in movement pathways of fluid and metallogenic prognosis, the relationship between supple threshold fluid and giant deposition, the computer simulation and so on.

Key words: Ore - forming fluid, super - threshold fluid, pressured discharging flow, ore - forming reaction systems, giant deposit

在纪念侯德封先生诞辰 100 周年暨 21 世纪地球科学发展战略研讨会上的报告,2000,4.

本期作者简介



沈远超(1943年-),男,研究员(博士生导师),岩石学及矿床学专业,主要从事成矿岩石学、矿床学及金矿成矿预测工作,现为中国科学院知识创新工程黄金项目首席科学家。



李光明(1964年-),男,博士,助研,1986年毕业于成都地质学院地勘系,1996年毕业于莫斯科地质勘探学院矿床学专业,获博士学位,现就职于中国科学院地质与地球物理研究所,主要从事矿床学及成矿预测方面的工作。



张连昌(1959年-),男,博士,副教授,1983年毕业于西安地质学院地质系,并于1988年获矿床专业硕士学位,1999年获中国地质大学地球化学专业博士学位,现在中国科学院地质与地球物理研究所博士后流动站工作,主要从事地球化学和矿床地质学的研究。



李厚民(1962年-),男,1983年毕业于西北大学地质系,1989年毕业于西安地质学院(现西安工程学院),获硕士学位,现为西安工程学院地球科学系副教授,中国科学院地质与地球物理研究所在读博士,主要从事矿床学的教学及科研工作。



刘铁兵(1950年-),男,1981年获中国科技大学硕士学位,1988年获美国辛辛那提大学博士学位,现为中国科学院地质与地球物理研究所副研究员,矿床学专业,主要从事金矿成矿预测工作。



张启锐(1939年-),男,研究员,1964年毕业于北京大学,1968年研究生毕业于中国科学院,专业为地层学、数学地质,目前从事金矿地质及震旦系冰川地层研究工作。



邹为雷(1971年-),男,1995年毕业于长春科技大学地球科学系,1998年获长春科技大学矿床地质学硕士学位,现为中国科学院地质与地球物理研究所博士生,主要从事岩浆岩石学及金矿成矿预测研究。



石昆法(1939年-),男,现任中国科学院地球物理研究所研究员,研究方向为浅层地球物理,研究专业为电法勘探。



杨金中(1970年-),男,1994年毕业于长春地质学院地质系,1997年在长春科技大学获矿床学硕士学位,现为中国科学院地质与地球物理研究所博士研究生,主要从事大地构造与成矿、矿体定位预测等方面的研究工作。



荆林海(1971年-),男,1994年7月毕业于山东矿业学院地质系,1997年7月在中国科学院遥感应用研究所获地图学与遥感专业硕士学位,现攻读博士学位,主要从事遥感图像处理及遥感地质应用研究。



曾庆栋(1964年-),男,1986年毕业于长春地质学院地质系,1989年、1997年在长春地质学院先后获得构造地质学专业硕士学位、矿床学专业博士学位,1997-1999年中国科学院地质研究所博士后,现为中国科学院地质与地球物理研究所助理研究员,主要从事金矿成矿预测工作。

通讯地址:北京德外祁家豁子
中国科学院地质与地球物理研究所
邮政编码:100029