

金矿床热液成矿体系的耦合作用研究

梁俊红, 姚玉增, 金成洙, 王建国

(东北大学 资源与土木工程学院地质系, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 金矿床中热液流体成矿作用作为一种半开放—开放体系, 其过程是由多种因素相互耦合的。这些耦合作用包括含金成矿热液流体体系与控矿环境之间的耦合作用, 含金成矿流体体系内素的耦合作用, 外部环境和各个控矿条件的耦合作用。其中外部的控矿环境与含金成矿热液流体的耦合程度决定了矿床的形成与否。

关键词: 金矿床; 热液成矿体系; 耦合作用

文献标识码: A

中图分类号: P611; P618.51

人类社会自进入 20 世纪以来, 随着量子理论 (1900) 和相对论 (1905) 的诞生, 自然科学, 尤其是物理学呈现了惊人的进展, 使得科学——首先是基础科学不可能再沿袭原有的理论框架走下去。人们的科学观和方法论也由原来机械的、还原的和封闭的所谓机械论, 转到系统的、整体的和开放的所谓系统的整体论的轨道上来。特别是到了 20 世纪 30 年代后, 这种观点和方法得到了迅速的发展, 形成了系统科学理论的思想体系, 包括现在人们称为“老三论”的系统论、控制论和信息论科学。进入 60 年代之后, 系统科学向更高的层次发展, 相继提出了一系列系统科学的新理论, 最为突出的是被称为“新三论”的耗散结构论、协同论和突变论^[1]。地球科学发展到今天, 已经使人们把地球看作一个综合系统。这个综合系统是作为相互作用的各种过程的结合, 而不是单个组成部分的堆积, 所有的组成部分以某种方式协同起着作用。在这个综合系统中, 由于各个子系统之间和子系统内部之间相互作用的能量和物质的产生、运移、富集时间尺度跨度很大 (小到 s—h, 大到 $10^6 \sim 10^8$ a), 所以它们之间的相互作用是十分复杂的^[2~4]。

随着新的理论的引入, 成矿作用研究近年来有了十分迅猛的发展, 特别是金矿床中热液成矿作用的研究也取得了较大发展。本文试图对其进行简单的探讨。

1 含金成矿热流体体系与控矿环境之间的耦合作用

金局部富集的成矿过程, 整体上受成矿流体体系与控矿环境的耦合关系所制约。热流体体系是一种半开放—开放系统, 它与周围环境之间存在物质、能量的交换和相互作用。在相互作用过程中, 虽然不断出现暂时和局部的准平衡态, 但随着能量的不断耗散, 过程在总体上朝着远离平衡的方向发展。“远离平衡时出现的新的状态, 可以具有一种令人惊异的有序程序, 此时无数个分子在时间和空间中的行为达到协调一致。”成矿流体体系远离平衡的成矿作用在空间上形成了不同的分带性, 从而决定了矿体的可预测性; 随着成矿热液流体体系的非线性的远离平衡态, 体系可能的稳定态的数目急剧增加, 当体系面临如此多的选择时会发生完全不可预测的动力学行为, 因而又决定了矿体预测的复杂性^[3]。只有当含金成矿流体体系与控矿环境中获得较充分的金元素的补给, 而且控矿环境又能为成矿流体在持续沉淀的阶段内提供相对稳定的沉淀空间, 才有可能形成品位高、规模大的工业矿体。

2 含金成矿热流体体系中内部因素的耦合作用

成矿热流体是一种复杂的系统, 其物质组成和物理化学性质在其运动过程中是变化的。成矿热流体体系由 3 个基本部分组成: 一是不同来源的和不同氢氧同位素组成的水, 包括岩浆水、变质水、建造水、混合岩浆水和加热大气降水等, 其中真正的岩浆水数量

极有限,混合岩浆水是源岩部分熔融派生物或者是岩浆同化了被大气降水改造过的岩石所派生的;二是那些能使热流体从围岩中萃取金的阴离子,可能部分来自岩浆水或混合岩浆水,更可能主要是热流体与围岩相互作用过程中获得的;三是金和伴生金属的络阴离子,金的络阴离子的物质运动形式在不同的物理化学条件下是变化的,诸如 AuCl_2^- 、 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 、 $\text{HAu}(\text{HS})_2^0$ 和 $\text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$ 等,分别在不同的物理化学条件下才处于相对稳定状态.实验地球化学、金矿床流体包裹体地球化学的研究,对金矿床的形成物理化学条件(温度、压力、氧逸度、硫逸度、二氧化碳逸度、氧化还原电位、酸碱度、流体化学组成类型、盐度、密度、流体中金的活度……)有了系统的认识.普遍认为形成金矿化的热液温度变化范围较大, $T=100\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$, 峰值为 $240\text{ }^\circ\text{C}$, 成矿热液具有弱酸—中性—弱碱性特征, $\text{pH}=\text{pH}^*\pm 1$ (pH^* 表示成矿温度下热液的中性值).成矿热液中主要阳离子为 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} , 气体中以 CO_2 、 H_2S 为主;主要阴离子是 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 HS^- 、 S^{2-} 、 CO_3^{2-} 和 OH^- . 其中形成金稳定络合物的配位体的大致浓度是 $\text{Cl}^-=1\text{ m}$, $\Sigma\text{CO}_3^{2-}=0.1\text{ m}$, $\Sigma\text{S}=0.1\text{ m}$; Cl^- 、 S^{2-} 、 HCO_3^- 和 HS^- 是形成金稳定配合物的主要配位体.一般弱酸性、高温的情况下,以 Cl^- 作配合物的金的配合物比以 HS^- 为配合物重要得多;在相对弱碱性、低温的热液成矿流体体系中 HS^- 为配合物才显得更为重要.成矿流体中金的浓度较低,如新西兰 Broad Lands 地热体系中含金仅 0.04×10^{-9} ,在其沉淀物中却含有 55×10^{-6} 的金,这表明成矿流体中金浓度的高低不是控制金矿化产生的关键因素,关键是时间和沉淀速度.同位素地球化学对成矿流体的来源研究起到了推动作用,人们可以通过同位素的示踪作用了解和区分不同起源和不同性质的成矿物质和成矿流体的类型.通过上述研究,对各类金矿床的形成、演化及制约因素有了一个全面的了解,丰富和发展了金矿的成因理论^[6,7].

含金热液流体体系在运动过程中,与下降的大气降水和围岩相互作用,发生了物质和能量的交换,所以其物质组成和物理化学性质是变化的,这种变化具有“四维差异”的特征,即体系的物质组成和物理化学性质在三维空间的不同位置和时间维的不同阶段都存在着差异.一般说,压性、压剪性断裂处于较高的相对封闭的还原环境.此时流体在 K^+ 、 Na^+ 等碱金属离子参与下,从围岩萃取金元素形成热液流体,含

金配合物、螯合物或真溶液沿着减压、降温的方向向张性、张剪性空间迁移.张性断裂一般处于低温、低压半开放—开放的氧化环境.由于拉张扩容岩石的裂隙度和渗透率的增高,有利于成矿溶液沉积和因物理化学环境的突变而使成矿元素金的配合物、螯合物等分解、沉积成矿.上述的成矿过程也很好地解释、说明了“无金不碱”、金矿床成矿作用是一个开放—半开放体系等一些现象.热液流体物理化学性质的差异,特别是温度、压力、酸碱度、氧化还原电位、硫和氯的活度、氧和二氧化碳的逸度,以及硫的总浓度等参数的变化区间,足以使其既有从围岩中萃取金的能力,又能使金搬运并在适宜的三维空间和时间阶段沉淀并富集成矿.贾跃明(1992)研究认为:流体成矿系统具有方向性、相关性、指示性,并指出“流体成矿系统不同部位的地质变化是与其环境相互适应的,各种变量的组合并非随机和杂乱无章的,而是相互配合和协调的.所以,在地质条件和物理化学环境限定的情况下,如果已知某几个变量,则系统内必然存在与之相互配套的其他变量,并且彼此之间存在明显的相关性与依存性.”^[8]

3 外部环境和各个控矿条件的耦合作用

根据热力学原理,金的转移、富集必须具备如下条件:

$$\mu_{\text{deposit}} < \mu_{\text{transport}} < \mu_{\text{source}} \quad (1)$$

$$\mu = f(a_{\text{Au}}, P, T, \dots) \quad (2)$$

其中 $\mu_{\text{transport}}$ 为沉积场中金的化学势, μ_{source} 为运移的热液流体中金的化学势, μ_{source} 为源地金的化学势, a_{Au} 为金的活度, P 为压力, T 为温度.从(1)、(2)式可以看出,除金的活度和压力外,温度是控制金迁移的主要因素.岩浆活动、变质作用、中生代火山岩的分布及现代地热田因具有较高的温度或高热流值,所以被认为是引起金迁移的重要热动力;与之相对应的岩浆热液、变质热液和火山岩及地热田中以热驱动的以大气循环水为主的各种混合热液是导致金迁移的介质.

对于成矿系统来说,除了成矿热流体体系之外,其控矿环境也是必不可少的重要组成条件.尽管控矿系统的表现形式多种多样,但系统的基本控矿的条件有明显的共性,即存在有利于成矿的物质和能量背景场,其中物质场包括固体地球化学背景场、熔体地球化学背景场和流体地球化学背景场,能量场包括热流场和应力场.控矿系统的物质组成和物理化学条件,

特别是化学成分、温度和压力在三维空间内的差异——浓度梯度、温度梯度和压力梯度,驱动热流体朝着一定方向运动和演化。当外部各控矿条件之间以及与成矿热流体之间的耦合程度较好时,体系朝着有利于金的局部富集成矿的良性循环方向发展,当各控矿条件之间以及体系和环境的耦合程度较差时,体系朝着非良性循环方向发展,甚至使成矿过程终止。各种控矿条件是以“物质—能量”综合场的形式对热流体体系的成矿过程起着整体的协同制约作用。

周世泰认为:燕山运动使华北古老地块活化,其中金在岩浆热液的作用下析出并迁移富集,成矿物质来源于太古宙老变质岩。这表明岩浆活动是促使华北地台太古宙变质岩中金迁移的动力,而岩浆热液是迁移金的介质。此外,刘义茂(1983)、胡受奚(1983)和栾世伟(1985、1988)等对岩浆作用在迁移金过程中所作的贡献也做了详细的研究。众所周知,环太平洋浅成低温热液金银矿床均与中新世代的火山岩、温泉和现代地热体系密切相关。该地区较高的地热梯度是引起金矿化的内在的原因。因为对于(2)式,当 T 增高时,引起 μ_{source} 的增大,导致 μ_{source} 大于 $\mu_{\text{transport}}$ 和 μ_{deposit} ,从而促使金活化、富集作用的发生。

构造体系的控矿作用在空间上具有层次性、时控性、分级性^[9]。成矿期的浅层构造体系往往由脆性断裂所组成,它主要是提供成矿含金热流体运移的短程通道而具有配矿性和提供矿质的沉积空间而具容矿性。巨型和大型构造体系影响深度常常较大,断裂可以切穿地壳,在垂直方向上具有不同层次的性状,例如,穿壳断裂在浅部为脆性断裂、破碎带,中部为脆—韧性断裂,深部可以转化为韧性。一般来说,穿壳断裂往往是导矿构造,中、下地壳断裂多起导矿和配矿的作用,上地壳断裂多为容矿构造。多数的内生热液矿床,包括金矿床的形成过程是下地壳酝酿、断裂引导、上壳成矿。构造体系的时控性表现在体系的演化往往制约着矿床的演化,含金地质体或构造带都程度不同地经历了由韧性变形→韧脆性变形→脆性的各个阶段,同时伴随有金元素的逐渐聚集而成矿。就宏观域应力场作用而言,在岩石的塑性变形阶段,金元素首先向高应变区初步聚集,形成金的高丰度背景区(带),这就可能导致矿源层(岩)的形成。当岩石进入脆性高变形阶段,金元素进一步向应力集中区迁移富集成矿,这一阶段也就是上述的金的热液成矿作用发生过程。就控矿构造体系的分级性而言,在同一构

造带内,成矿和成矿期构造的规模有大有小,切割有深有浅,控矿作用也不尽相同。直接控制矿体就位的构造有两种类型:(1)成矿前的构造;(2)成矿期的构造。其中前者主要功能是提供矿体就位的空间或连通导矿构造而作为成矿流体运移的通道;后者是与成矿同期形成的构造,这种构造的形成作用是在统一的构造—物理—化学系统中耦合、协同发展的。与金矿床热液成矿作用有密切关系的是第(2)种成矿期构造。它对成矿流体的主要作用有:①影响化学反应的压力条件;②提供物质成分变化所需要的能量,影响化学反应的温度条件;③持续的应力作用导致化学组分的迁移;④应力腐蚀作用,有时还会在微裂隙端中产生化学腐蚀作用;⑤可能改变其他的物理化学条件,如氧化—还原电位、酸碱度等;⑥对前期构造的再改造;⑦构造演化的同时控制矿床的演化。

不同期次、不同规模 and 不同方向的构造在空间上的耦合,将为金矿床的形成提供有利的部位。从太古宙到中生代各类金矿都明显地受各种构造控制。而这些构造往往具有长期持续活动和多阶段成矿的特点;即使某些受层位控制的金矿床(如加拿大的Hemlo金矿)也受构造的控制。M. 博纳梅宗指出:含金剪切带位于陆壳线形薄弱带内,这些薄弱带是多次构造活动的场所。凡受到剪切变形的岩石,与围岩相比都具有较大的渗透性。因而它们为构造通道内流动的热液起了真正的“导流”作用。裴荣富(1999)将我国东部的华北地台北缘成矿构造域内的构造分成“行(Lines)”、“列(Rows)”、“汇(Clusters)”,即“LRC模式”。其中的“行”指前中生代近东西向构造带方向,“列”指中生代矿床在中国东部表现的NNE—NE及NW构造带方向,上述构造带交叉处称“汇”。在“汇”附近出现中生代构造岩浆的耦合形成的异常,构成成矿构造聚敛场。构造对金矿化的控制作用具有如下的特征:构造不仅为成矿流体提供了良好的渗透性的通道,还为金矿化提供了矿化的场所;断裂容矿的脉状矿床并不是按静止应力场演化的,而是高压流体由于连续水压力使构造进一步发育,构造活动表现明显的多期多阶段特征,而不同期和阶段的活动对金矿化的制约表现为继承性的特点,并为金矿化提供了良好的场所^[10]。

4 金矿床成矿作用过程中时空四维条件的耦合关系

成矿物质的局部富集还不能离开特定的时、空条件的耦合作用。近地表岩浆—热流体体系的成矿过程

主要发生在火山喷发的晚期、期后或间歇期;高侵位岩浆—热流体体系的成矿过程主要发生在侵入体定位的晚期或期后的特定阶段,即构造—岩浆的强烈活动告一段落,物质—能量的运动形式被热流体活动所代替,处于一个相对稳定的阶段,致使热流体体系与控矿环境的相互作用,特别是成矿物质的反复萃取—运移—沉淀过程得以持续、充分地进行。另一方面还需要有利成矿的特殊的三维空间条件:(1)较大的热流体循环空间,它致使流体体系的水、活化剂(阴离子)和金元素得到充分的补给;(2)相对集中的金沉淀空间,以提高矿体和矿床的品位和吨位;(3)持续的成矿作用,含金流体运移和沉淀过程能相对稳定地沿着某种“极限痕迹”反复持续地进行,以增加金的积累;(4)成矿物质局部富集三维空间外围的“屏蔽系统”(包括地球化学屏障和地球物理屏障),可以具有不同的属性,诸如构造界面、岩性或岩相界面、地球化学性质稳定的界面和物理化学性质突变的界面等。成矿热流体在较大的三维空间较长的时间过程中获得成矿物质的充分补给,而在相对较小的三维空间中沉淀,是成矿物质局部富集必不可少的重要条件。

综上所述,成矿热流体成矿作用是一个半开放—开放系统,金矿床中石英脉是多种成矿因素的综合耦合作用的结果。其中外部的控矿环境(包括断裂构造、岩浆—火山作用、变质作用等)与含金成矿热液

流体的耦合程度决定了矿床的形成与否。它们耦合的程度越好,成矿的可能性就越大,否则成矿的可能就小一些。

参考文献:

- [1] 孙岩,等.断裂构造地球化学导论[M].北京:科学出版社,1998.1—2.
- [2] 国家自然科学基金委员会.自然科学学科发展战略研究报告——地球化学[M].北京:科学出版社,1997.88—89.
- [3] 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.
- [4] 关广岳.金属矿床氧化带微生物地球化学[M].北京:科学出版社,2000.1—9.
- [5] 柯尼文 P,海菲尔 R.时间之箭——揭开时间最大奥秘之科学旅程[M].江平,向守平,译.长沙:湖南科学技术出版社,1995.162—166.
- [6] 李兆霖.火山和相关侵入岩地区金矿的形成机制——内外多元素耦合、四维局部富集成矿[J].1997,22(3):268—274.
- [7] 汪东波.金矿床地质地球化学研究新进展[J].矿产与地质,1991,(2):101—106.
- [8] 贾跃明.成矿预测新方向:流体成矿系统与成矿作用研究[A]:见:中国地质矿产信息研究院.走向21世纪地质与矿产资源.北京:地质出版社,100—102.
- [9] 刘迅,等.地质力学在矿产资源勘查中的应用[M].北京:地质出版社,1998.1—52.
- [10] 裴荣富,熊群尧.中国特大型金属矿床成矿偏在性与成矿构造聚敛(场)[J].矿产地质,1999,18(1):37—46.

RESEACH ON THE COUPLING PROCESS OF GOLD ORE-FLUID SYSTEM

LIANG Jun-hong, YAO Yu-zeng, JIN Cheng-zhu, WANG Jian-guo

(*Institute of Resources and Civil Engineering, Northeast University, Shenyang 110006, China*)

Abstract: Gold metallogenic process, in a semi-open to open ore-fluid system, covers a series of coupling processes including those between hydrothermal ore-fluid system and ore-controlling circumstance, between the internal factors of hydrothermal ore-fluid system, and between external environment and each ore-controlling condition, of which the coupling level between hydrothermal ore-fluid system and ore-controlling circumstance decides whether a gold deposit forms.

Key words: gold deposit; ore-fluid system; coupling process

作者简介: 梁俊红(1972—),男,硕士,1999年毕业于东北大学矿产普查与勘探专业,现于东北大学研究生院攻读博士学位;通讯地址:沈阳市和平区文化路3号巷11号 东北大学地质系,邮政编码110004.