卷(Volume)26,期(Number)1,总(SUM)92
页(Pages)55~61,2002,3(Mar.,2002)

大地构造与成矿学
Geotectonic et Metallogenia

地质流体的输运-化学反应与成矿作用微观机制研究

——以安徽冬瓜山层控夕卡岩型铜矿床为例

凌其聪[1,2], 刘丛强[1], 鲍征宇[2]

(1. 中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体地球化学作用实验室,贵州 贵阳 550002; 2. 中国地质大学地球科学学院,湖北 武汉 430074)

摘 要: 以冬瓜山层控夕卡岩型铜矿床的基本地质特征为基础建立了成矿作用的地质模型,运用成矿作用动力学理论将其转化成动力学模型,然后对动力学模型求解得到刻划矿质在断裂—多孔介质体系中输运-化学反应演化规律的解析解。研究揭示冬瓜山矿床的成矿微观机制为:成矿流体受外力的驱动在断裂-多孔隙复杂介质的输运过程中,由平流、动力弥散、扩散作用与交代反应、溶解-沉淀反应相互耦合作用而成矿。介质的有效孔隙度和渗透率等动力学参数是矿体的空间分布及规模大小的主要控制因素。模拟结果合理地解释了矿体的空间展布、矿石品位及矿石结构构造的空间变化特征等矿床的基本地质特征。本研究显示,一旦成矿过程的基本动力学参数能确定,可预测成矿的位置、矿体长度、厚度及贫富变化的规律,显示动力学研究具有潜在的重要应用价值。本文为研究复杂介质中矿床形成的微观机制提供了一种新的思路。

关键词: 流体输运-化学反应; 成矿作用微观机理; 层控夕卡岩型矿床: 冬瓜山铜矿床

中图分类号:P611 文献标识码:A 文章编号:1001-1552(2002)01-055-07

已有的研究表明,大多数矿床是地质流体输运过程中经复杂的作用而形成的。笔者从地质流体输运-化学反应耦合作用的视角,以我国长江中下游独具特色的层控夕卡岩型铜矿床为研究对象,运用成矿作用动力学方法阐述其成矿作用的微观机制,展示成矿作用动力学研究的良好应用前景。

1 成矿作用的地质特征(地质模型)

冬瓜山层控夕卡岩型铜矿床位于中国长江中下游多金属成矿带铜陵矿区,是目前已发现的该类矿床中规模最大的一个矿床,其地质特征兼具典型性和代表性[1992,翟裕生,等;1999,Pan,等;1999,凌其聪]。此处不详细介绍其他地质特征,只强调以下几个方面的特征,它揭示了该矿床的成矿机制:(1)赋矿地层特征:矿体的主要赋矿层位是上石炭统黄龙组(C_2h),地层岩性为白云岩、白云质灰岩或灰岩,具化学活动性强,易发生交代作用特点。矿体的直接底板是泥盆系上统五通组(D_3w)砂页岩,直接顶板是二叠系下统栖霞组(P_1q)的含碳粉砂质页岩。顶、底板岩层均具有孔隙度小,渗透率低、化学活动性差的特征,成为良好的屏蔽层,利于成矿流体集中沿化学活动性强、易被交代的 C_2h 流动-反应而形成矿体。(2)控矿构造特征:断裂是冬瓜山矿床的主要控矿构造[1992,翟裕生,等;1999,凌其聪]。矿区

收稿日期:2001-06-14;改回日期:2001-09-15

基金项目:科技部攀登计划预选项目(批准号:95-预-39)、国家自然科学重点基金(批准号:49633120)、和杰出青年科学家基金(批准号:49625304)共同资助.

作者简介:凌其聪(1963-),男,广西人,博士后,副教授,主要从事地球化学,成矿作用动力学和矿物学的科研与教学工作.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

内有两类断裂与成矿密切相关，一类是切穿地层横跨矿区走向 NE、倾角陡（70°～85°）的盖层断裂，这种断裂可能与隐伏的区域性深大断裂相通[1992，翟裕生，等]，断裂空间已被岩浆侵入体占据，岩体与地层的接触带构造成为成矿流体向上运移的主要通道。另一类是本区特有的多重层间断裂，它们是本区主褶皱构造形成过程中的伴生层间滑脱构造[1991，常印佛，等]。这类构造出现于地层内岩性力学性质存在差异的岩层之间，主要沿地层层理发育，产状近于相互平行。它们是成矿流体从接触带构造流入地层的主要通道，同时亦为主矿体提供了赋矿空间。（3）矿体特征：主矿体呈层状沿黄龙组（C_2h）分布，产状与地层一致，矿体延长超过 300 m，宽 200 m 至 800 m，平均厚度约 60 m。宏观上看似一个单独矿体，经钻孔和部分井下工程揭示是由若干近于相互平行，似层状，厚度为 4～6 m 的次一级小矿体群构成（图 1）。矿石的主要金属矿物有黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿，脉石矿物为石榴石和透辉石。矿石的主要结构是交代结构，矿石具块状构造、浸染状构造、纹层状构造等，矿体还表现了如下典型特征：在接近岩体处及每一次级小矿体层的中央部位矿石具块状构造，向边部渐变为浸染构造；矿石的铜品位亦从近岩体至远离岩体，及从矿层中央部位向边部呈现由高到低的变化。

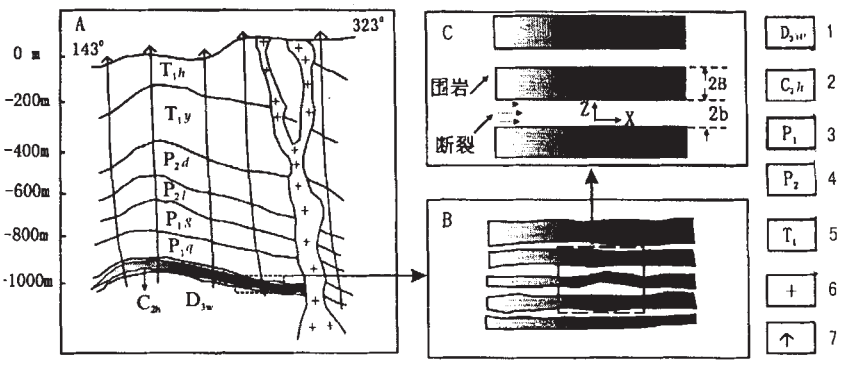


图 1 冬瓜山铜矿床成矿作用的断裂－围岩体系

Fig. 1 Fracture-wall rock system of ore-forming in Dongguashan Cu deposits

A－展示主矿体产状特征的地质剖面简图（据 1992，储国正，等）；B－主矿体：宏观上看为单一矿体，细观上为多个近于平行、层状或似层状的小矿体组成；C－成矿的介质体系，由实际体系简化以开展动力学研究. 1－泥盆系砂岩；2－上石炭统黄龙组；3－下二叠沉积岩；4－上二叠沉积岩；5－下三叠沉积岩；6－花岗岩类侵入体；7－探矿钻孔

根据冬瓜山矿床的矿床地质特征，可归纳如下成矿模式：（1）成矿作用发生于具化学活动性的孔隙－断裂共存的介质体系中（C_2h 碳酸盐层），断裂构造是成矿流输运的通道，层间断裂同时亦为赋矿空间。（2）成矿流体受岩浆热力及构造应力的驱动，沿切层断裂上升，然后被导入地层层间断裂中，在向前运移过程中发生了一系列的化学反应（矿物的溶解和沉淀、交代作用等），从而形成矿床。成矿过程实质上是成矿物质的输运和化学反应耦合作用的过程。

2 成矿作用的动力学模型

从上述成矿作用概念模型中可见，成矿过程是一种极其复杂的输运化学与反应耦合的动力学过程，而本质上这些过程是一系列的物理化学过程。可根据这些物理化学问题所遵循的有关物理化学原理和定律来建立相应的数学物理方程即动力学模型。通过对模型进行求解和分析，来了解成矿体系中所发生的各种作用和过程的机制，并可对其演化规律作出预测。

本文建模的基本思路是：成矿过程流体输运主要涉及矿质沿断裂轴向的平流作用、分子扩散作用、动力弥散作用；从断裂向围岩的分子扩散作用；围岩断裂表面对矿质的吸附作用；围岩内部对矿质的吸附作用；矿质与围岩的交代作用及矿质沉淀反应所造成的矿质浓度渐次降低作用等。

由于成矿的介质、成矿过程极其复杂，现有的计算机硬、软件条件还不足以对这些过程作仿真模拟，开展动力学研究一般是抓住主要和关键因素，而对较为次要的因素则作合理简化。本文作了以下合理简化假设：层间断裂平行并呈等距分布、流体输入的初始浓度恒定、流体在断裂中输运速率恒定、任意时刻断裂中的横向扩散和动力弥散作用使矿质在穿越断裂宽度范围内完全混合即断裂内成矿流体视为均一。又由于断裂的延伸长度远远大于它的宽度，流体在断裂中的输运速率远大于在围岩中的速率，围岩中的流体输运方式主要为扩散作用，平流作用可以忽略不计。综上所述，可将断裂中的输运作一维问题处理，而围岩中的输运则可视为垂直于断裂延伸方向，这样便可以利用解析法对动力学模型进行求解，以了解成矿过程的基本特征和演化规律。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

利用成矿作用动力学理论的质量平衡原理[1972,Bear;1989,Sudicky,等;1996,Vanderkwaak,等;1998,於崇文,等]可得到成矿流体在断裂中的输运 – 化学反应耦合过程动力学方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{v}{R}\frac{\partial C}{\partial x}-\frac{D}{R}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+\lambda C-\frac{\varphi D'}{bR}\frac{\partial C'}{\partial z}\bigg|_{z=b}=0 \quad (0\leqslant x\leqslant\infty) \tag{1}$$

C:断裂中矿质的浓度;C':围岩中矿质的浓度;x:沿断裂轴方向的距离(图 2C);z:沿垂直于断裂垂直于断裂延伸向的距离(图 2C);D:断裂中的动力学弥散系数;D':有效扩散系数;v:矿质的流速;λ:矿质浓度因交代反应和沉淀作用衰减的强度系数,据 $t_{1/2}$ 可以计算出 λ 的值[1999,凌其聪];R:延滞系数;b:断裂的半宽度(图 2C);φ:岩石孔隙度;t:时间。说明:D 可由矿质在溶液中的扩散系数 D^* 来计算,而矿质的有效扩散系数 $D'=\tau D^*$,见文献:1999,凌其聪)。

方程(1)所对应的初值和边界条件为:

$$C(0,t)=C_0,\ C(\infty,t)=0,\ C(x,0)=0$$

成矿流体在围岩中的输运 – 化学反应耦合过程动力学方程为:

$$\frac{\partial C'}{\partial t}-\frac{D'}{R}\frac{\partial^2 C'}{\partial z^2}+\lambda C'=0 \quad (b\leqslant z\leqslant B) \tag{2}$$

式中 B 为断裂间距的一半(图 2C),其余符号的物理意义见式(1)的说明。方程(2)所对应的初值和边界条件为:

$$C'(z,x,0)=0,$$
$$C'(b,x,t)=C(x,t),$$
$$\frac{\partial C'}{\partial z}(B,x,t)=0.$$

将方程(1)、(2)与它们的初值及边界条件联立起来,便构成了描述层控夕卡岩型矿床成矿作用的完整动力学模型。通过对这一组动力学方程求解,便可揭示成矿作用的微观机制。

3　动力学模型的解及其所揭示的成矿微观机制

3.1　动力学模型的解

运用拉普拉斯变换的方法可得到上述动力学模型的解析解如式(3)、(4)(详细的解方程过程及求解方法可参考文献[1999,凌其聪])。

在断裂中:

$$\frac{C}{C_0}=\frac{2}{\sqrt{\pi^3}}\exp(\gamma x)\cdot\int_l^\infty\exp\left[-\xi^2-\frac{(\gamma x)^2}{4\xi^2}-\frac{R\lambda x^2}{4D\xi^2}\right]\cdot\int_0^\infty\frac{\varepsilon}{\lambda^2+\varepsilon^4/4}\exp(\varepsilon_R)$$
$$\cdot\left\{exp(-\lambda T)\left[\frac{\varepsilon^2}{2}\sin(\varepsilon_l)|_r-\lambda\cos(\varepsilon_l)|_r\right]+\frac{\varepsilon^2}{2}\sin(\Omega)+\lambda\cos(\Omega)\right\}d\varepsilon d\xi \tag{3}$$

其中:$l=\frac{x}{2}\sqrt{R/Dt}$,$\varepsilon_R=-\frac{\sqrt{vkx}\varepsilon\varphi R'D'}{8bR}\left(\frac{\sinh(\sigma\varepsilon)-\sin(\sigma\varepsilon)}{\cosh(\sigma\varepsilon)-\cos(\sigma\varepsilon)}\right)$;$\sigma=\sqrt{R'/D'}\,(B-b)$;

$\varepsilon_l=-\frac{\sqrt{vkx}\varepsilon\varphi R'D'}{8bR}\left(\frac{\sinh(\sigma\varepsilon)+\sin(\sigma\varepsilon)}{\cosh(\sigma\varepsilon)+\cos(\sigma\varepsilon)}\right)$。

围岩中:

$$\frac{C'}{C_0}=\frac{2}{\sqrt{\pi\sigma^2}}\exp(\gamma x)\cdot\int_l^\infty\exp\left[-\xi^2-\frac{(\gamma x)^2}{4\xi^2}-\frac{R\lambda x^2}{4D\xi^2}\right]\cdot\int_0^\infty\frac{\varepsilon}{\lambda^2+\varepsilon^4/4}\exp(\varepsilon_R)$$
$$\cdot\sum_0^\infty(-1)^n(2n+1)\cos\left[\frac{(2n+1)(B-z)\pi}{2(B-b)}\right]\cdot\left\{\frac{\exp(-\lambda t)}{\pi^4(2n+1)^4/16\sigma^4+\varepsilon^2/4}\right.$$
$$\cdot\left[\frac{\varepsilon^2}{2}\left(\frac{\pi^2(2n+1)^2}{4\sigma^2}\sin(\varepsilon_l)|_r-\frac{\eta^2}{2}\cos(\varepsilon_l)|_r\right)-\lambda\left(\frac{\pi^2(2n+1)^2}{4\sigma^2}\cos(\varepsilon_l)|_r+\frac{\varepsilon^2}{2}\sin(\varepsilon_l)|_r\right)\right.$$
$$+\exp\left(-\frac{\pi t(2n+1)^2}{4\sigma^2}\right)\left(\frac{\varepsilon^2}{4}\cos(\Omega')+\frac{\pi^2\varepsilon^2(2n+1)^2}{8\sigma^2}\sin(\Omega')+\frac{\lambda\pi^2(2n+1)^2}{4\sigma^2}\cos(\Omega')\right.$$
$$\left.\left.-\frac{\lambda\varepsilon^2}{2}\sin(\Omega')\right)\right]+-\frac{\lambda\varepsilon^2}{2}\sin(\Omega')+\frac{4\sigma^2}{\pi^2(2n+1)^2}\left(1-\exp\left(-\frac{t\pi^2(2n+1)^2}{4\sigma^2}\right)\right)$$
$$\left.\cdot\frac{\varepsilon^2}{2}\sin(\Omega)+\lambda\cos(\Omega)\right)\right\}d\varepsilon d\xi \tag{4}$$

其中:$\Omega'=\Omega+\frac{Rx^2\varepsilon^2}{8\sigma^2}$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(3)、(4)式为积分形式,幂函数的变量中又出现函数,看似非常复杂。但对被积函数进行考察后就会发现,这种貌似复杂的函数表现了十分简单而有规律地变化。

通过对(3)、(4)式进行整理,可导出矿质在断裂、围岩中的迁移距离表达式,从而可预测某一特定条件下成矿流体所能形成矿体的长度和厚度。例如,对于矿质浓度为 $C/C_0 = A$ 的成矿流体,从式(3)中可以导出矿质在断裂空间中运移的距离表达式为:

$$dA = \frac{\ln A}{v[1 - (+4/r \cdot (+\beta)^{1/2})]} \quad (5)$$

其中:$r = v^2/\lambda DR$, $\beta = \frac{\varphi (R'D')^{1/2}}{\lambda^{1/2} bR} \tanh (\lambda^{1/2})$

据(5)式可估算矿体的长度。同样地亦可从式(4)导出矿质在围岩介质中运移的距离表达式,从而可估算矿体的厚度。

3.2 动力学模型揭示的成矿作用微观机制

以下给定几组不同的参数值,通过考察上述解析解的行为特征及其变化规律来了解不同因素对矿质输运行为的影响方式和影响情况。据笔者对冬瓜山矿床的成矿介质参数的实测[1999,凌其聪],成矿围岩的孔隙度介于 0.02 至 0.01 之间,渗透率介于 $1\times10^{-18}m^2$ 至 $4\times10^{-20}m^2$ 之间(据之可推算出 D^* 值)。关于断裂的张开度(2b),笔者认为冬瓜山矿床的成矿深度大(> 1 000 m),深部所承受的静岩压力较大,其中所形成的断裂张口不可能很大,此处设为 0.05 m。结合对比文献资料上的有关参数值[1982,1989,Sudicky,等;1996,Vanderkwaak,等;1998,於崇文,等],对冬瓜山矿床取下列参数值较为合理:2b = 0.05 m, $\varphi = 0.01$, $D^* = 4\times10^{-19}m^2$/年, $t_{1/2} = 250\ 000$ 年, $\tau = 0.1$, $R = 1.0$, $R' = 1.0$。

在取以上动力学参数固定值的基础上,取三组变化的参数:(1)v = 5 m/年,2B = 5 m;(2)v = 5 m/年,2B = 0.5m;(3)v = 0.05 m/年,2B = 5m。情形(1)和(2)只有断裂间距大小不同而其余参数取值完全相同,可通过对比以了解成矿介质体系中断裂发育的密度大小对矿质在围岩中的迁移及分布特征的影响。情形(3)与情形(1)仅流体的流动速率不同而其余参数取值相同,通过对比可以了解成矿物质在围岩中迁移的过程中纵向动力弥散作用所产生的影响(由于上文所建立的动力学模型中仅纵向动力弥散项为二次幂,如能忽略纵向动力弥散作用则描述矿质在体系中迁移规律的动力学模型将可大大简化,求解亦十分简单)。

图 2a 至图 2f 为本文所建立动力学模型解反映冬瓜山铜矿床成矿体系演化规律的部分结果图解。

图 2a 中给出了高流速低断裂密度(情形 1)下当含矿流体进入断裂后沿断裂运移 1 000 年、10 000 年、100 000 年以及当体系达到稳定状态时,矿质浓度的变化特征曲线。由于此时的 β/γ ① 值很小(远小于 0.02),结果一般解与无动力弥散($D = 0$)的特解的浓度变化轨迹十分相似,只需用一条曲线即可反映两者的变化特征。此时,矿质运移的最大距离 $d_{0.01} = 940$ m。而在相同流速下单一断裂体系中(图 2b),该值仅为 700 m。可见,由于多断裂体系中断裂之间的围岩厚度有限,造成矿质输运的距离增大了 240 m。因此,多断裂体系更有利于矿质作大距离迁移即更有利于形成延伸规模更大的矿体。将图 2a 与图 2b 进行比较,可以看到,取输运时间为 1 000 年时,多断裂体系与单一断裂体系的相对浓度 – 迁移距离曲线的变化特征几乎完全一致。这种现象可以这样来理解:此时,成矿流体在断裂中输运的时间还不足够长,因而,在横向上矿质尚未扩散到达分隔两断裂之间对称围岩厚度的中心,相邻断裂之间的相互影响不大。体系的输运特征实际上主要取决于各个断裂本身的输运特征。这样,流体在两个体系中的输运是等效的,结果当然一致。而当流体在断裂中的输运时间较长之后,多断裂体系中相邻断裂之间开始发生显著地相互制约:由于多断裂体系中断裂之间的围岩厚度有限,使得靠近源头处矿质先达到稳定状态,而远离源头处则较晚才能达到稳定状态。与单一断裂体系相对比,当体系中存在多断裂时,有利于矿质沿断裂方向迁移更远。

图 2c 给出了高流速高断裂密度(情形 2)下流体在断裂中输运了 1 000 年、10 000 年、100 000 年以及稳定状态条件下断裂中的相对浓度 – 迁移距离关系曲线。此时,由于 β/γ 值远小于 0.02, $D \neq 0$ 的一般解与 $D = 0$ 的特解的相对浓度 – 迁移距离关系变化特征亦可以用单一条曲线来表征。此时,矿质的最大迁移距离为 2 800 m,比上述断裂间距大的情形

① $\gamma = v^2/\lambda DR$, $\beta = \frac{\varphi (R'D')^{1/2}}{\lambda^{1/2} bR} \tanh (\lambda^{1/2})$ 对于特定的溶质,如 Cu 的络离子,参数 γ 表征了断裂中的平流作用和动力弥散的输运性质,而 β 则是度量对于断裂中一定量的矿质在其输运过程中向围岩基质扩散损失的相对量的参数。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

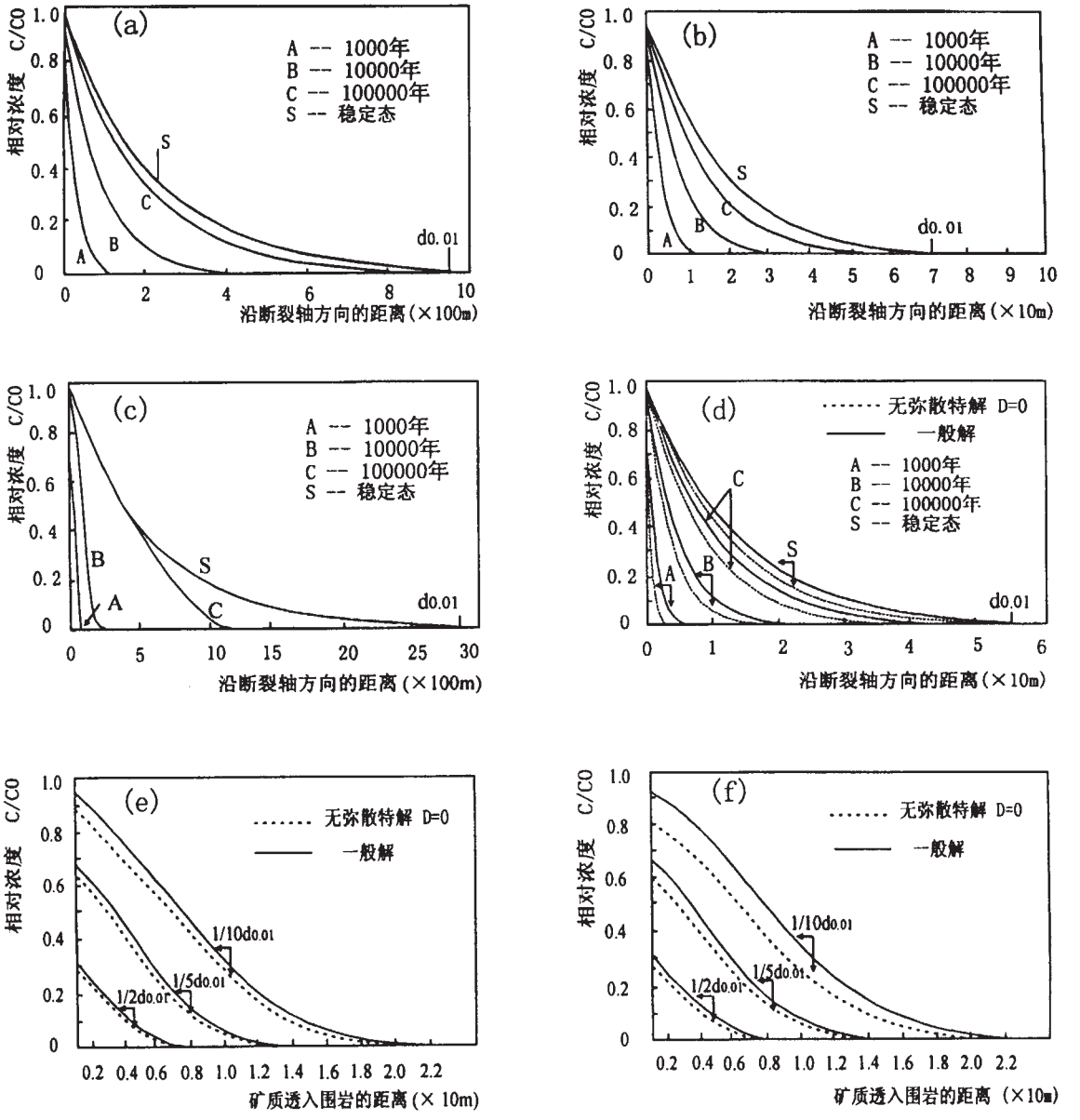


图 2　冬瓜山矿床成矿体系演化规律动力学模型图解

Fig. 2　Diagrams for dynamics model showing the evolution of ore – forming systems in the Dongguashan copper deposit

a – 高流速低断裂密度下矿质在断裂中的相对浓度 – 迁移距离关系 流速: 5 m/年,断裂间距,2B = 5 m,横座标单位 :×100 m); b – 高流速单断裂体系矿质在断裂中的相对浓度 – 迁移距离关系 流速 :5 m/年,断裂间距 :2B = 5 m,横座标单位: ×100 m); c – 高流速高断裂密度下矿质在断裂中的相对浓度 – 迁移距离关系 流速 :5 m/年,断裂间距 :2B = 0.5 m,横座标单位 :×1 000 m); d – 低流速低断裂密度下矿质在断裂中的相对浓度 – 迁移距离关系 流速: 0.05 m/年,断裂间距 :2B = 5 m,横座标单位 :×10 m); e – 高流速下矿质在围岩基质中的相对浓度 – 迁移距离关系 流速 :5 m/年,座标单位 :×1 000 m,$D_{0.01}$ 在 $C/C_0 = 0.01$ 的浓度水平上矿质的最大迁移距离); f – 低流速下矿质在围岩基质中的相对浓度 – 迁移距离关系 流速 :0.05 m/年,横座标单位 :×1 000 m, $D_{0.01}$ 在 $C/C_0 = 0.01$ 的浓度水平上矿质的最大迁移距离)

输运的距离高出 1 860 m, 为单一断裂体系的 4 倍。这一实例更清晰地反映了断裂的分布密度对矿质的迁移距离产生明显的影响。即断裂越密,流体流经时在每一处 "存储 "矿质的能力越有限,矿质迁移的距离更长。

图 2d 中给出了情形 3 给定的条件下,当含矿流体进入断裂后运移时间达 1 000 年、10 000 年、100 000 年以及达到稳定状态时, 矿质相对浓度 – 迁移距离关系特征曲线。一般解的其 $d_{0.01}$ 为 590 m, 而 $D = 0$ 特解的 $d_{0.01} = 510$ m。很显然,在所有时间段内 $D = 0$ 特解均滞后于一般解。当输运时间小于 100 000 年时,这种现象尤为突出。然而,在稳定

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

状态下近源头处及流体中矿质浓度较小处，两者差异最小。而当浓度为中等值的范围内两者差异最大。

对比图 2a、2b、2c 与图 2d，当矿质迁移速度很快时，弥散作用影响不明显，此时，每一时间演化曲线只需一根线即可代表整个体系的变化规律；而速度较慢时则对体系演化特征有显著影响，此时，考虑弥散作用与否反映其体系演化规律的曲线将是不同的，这意味着此时研究体系的行为必须考虑弥散作用，而实际成矿过程往往是极其缓慢的过程，因此，研究成矿作用机制必须考虑流体的动力弥散作用。

图 2e 和图 2f 分别是高速率和低速率下矿质进入围岩的相对浓度 – 迁移距离关系图。随着离开源头距离的增大，矿质的相对浓度越来越低，这将会导致随着离开成矿流体源头的距离不断增大，能在断裂及围岩中沉淀下来的矿质减少，结果矿石的品位将越来越低。这就合理地解释了现实矿床中所见到的地质现象（近岩体（岩体与围岩的接触带构造是成矿流体上升的源头）矿石品位高，远离岩体则低；矿体中央部位品位高向两侧围岩则品位渐低。同样亦能合理地解释了从近岩体处到远离岩体，从矿体中央向两侧矿石构造由块状渐变为浸染状（块状者含矿石矿物高浸染状者含量低）现象的形成机制。可见，矿质在多断裂体系中要比在单断裂体系中迁移的距离更大，而且，断裂愈密矿质迁移的距离愈远。

4 结论及讨论

本研究以冬瓜山层控夕卡岩型铜矿床的基本地质特征为基础建立起成矿地质模型，运用成矿作用动力学理论将其转换成动力学模型，然后对动力学模型求解得到刻划矿质在断裂—多孔介质体系中输运 – 化学反应演化规律的解析解。并导出了计算矿质迁移的最大距离的表达式，据之可估算在特定动力学条件下成矿体系能形成矿体的最大长度。研究揭示了冬瓜山层控夕卡岩型铜矿床的成矿微观机制是：成矿流体受外力的驱动在断裂—多孔隙复杂介质的输运过程中，由平流、动力弥散、扩散作用与交代反应、溶解 – 沉淀反应相互耦合作用而成矿。成矿介质的有效孔隙度、渗透率等因素控制着矿体的空间展布及矿体的规模大小。

成矿物质来源、成矿物质迁移途径和成矿物质沉淀部位通常简称为“源、流、汇”或“源、运、储”，是成矿学研究的基本问题，成矿作用动力学主要研究“流”和“汇”问题，即成矿的速率、机制和过程[1989，於崇文]。本文的研究结果表明，运用成矿作用动力学方法来研究成矿作用可以动态地和定量地阐述成矿作用机制，能较好地阐明矿床中主要地质现象的形成机制，通过深入地成矿作用动力学机制研究可预测成矿的位置、矿体长度、厚度及贫富变化的规律，从而大大促进人们对成矿作用认识的深化，显示动力学研究具有潜在的重要应用价值。同时，本文的工作亦可为研究多孔 – 断裂裂隙混合复杂介质中矿质输运 – 化学反应机制提供一个基本的思路，可作为解决那些更为复杂问题的基础。同时也为验证数值解模型提供了有用的依据。将野外资料用于所得到的解中可帮助我们确定实验参数，从而能够对更为复杂的介质 – 断裂体系模型作出预测。就冬瓜山层控夕卡岩型铜矿床而言，由以上的模型解的分析中可得到以下几点认识：

(1) 多断裂体系比单一断裂体系更利于矿质的长距离迁移，断裂愈密矿质可搬运愈远，形成的矿体延伸愈长。

(2) 当成矿流体运移速度较小时，动力弥散作用对成矿过程影响很大，而实际成矿过程一般均为十分缓慢的过程，因此，研究成矿作用问题时一般不能忽略弥散作用。

(3) 当得到成矿体系的有关参数后，可利用动力学模型预测矿体的长度和宽度。

(4) 成矿作用动力学研究结果合理地解释了矿床的主要地质特征，有利于更深入地理解成矿作用的机制。

必须提到的是，利用成矿作用动力学理论是可以建立包含各种影响因素，从而能充分反映成矿过程实际的动力学模型的，但那将是极其复杂的数理方程，在现有的计算机技术条件下仍无法解那样复杂的方程；再者，模型考虑的因素越具体，其代表性越差，则结论适用范围窄。从这个意义上说作合理简化假设是成矿作用动力学研究所必需的。

勿庸讳言，到目前为止，成矿作用动力学研究仍相当薄弱，尤其对成矿介质的动力学参数及成矿过程的动力学参数仍知之甚微，这是阻碍成矿作用动力学研究进一步发展的主要因素，因此，要使成矿作用动力学研究真正成为破解成矿机制之谜的利器，尚需更多的人来开展更为具体深入的研究，尤其是有关成矿动力学参数的实验研究。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献：

1972 Bear J. Dynamics of fluids in porous media [M]. Elsevier, New York,1 – 220.

1982 Sudicky E A and Frind E O. Contaminant transport in fractured porous media: analytical solutions for a system of parallel fractures [J]. Water Research, 18 (6): 890 – 956.

1991 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铁铜成矿带研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2 – 48.

1992 翟裕生, 姚书振,林新多,等. 长江中下游地区 Fe – Cu(Au) 成矿带 [M]. 北京: 地质出版社, 235.

1992 储国正, 李东旭. 顺层滑动构造对安徽狮子山矿田"多层楼"矿床的控制 [J]. 现代地质,6(4): 504 – 512.

1994 於崇文. 成矿作用动力学 – 理论体系和方法论 [J]. 地学前缘,1(2): 52 – 82.

1996 Vanderkwaak J E and Sudicky E A. Threedimensional analysis of variably-satured flow and transport in discretely-fractured porous media: Model development and illustrative examples [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 23(1 – 2): 1245 – 1420.

1998 於崇文,岑况, 鲍征宇. 成矿作用动力学 [M]. 北京: 地质出版社,1 – 230.

1999 凌其聪. 层控夕卡岩型铜矿床的成矿作用动力学研究 [D]. 博士学位论文,武汉:中国地质大学. 1 – 50.

1999 Pan Y, Dong P. The lower Changjiang (Yangtzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rock-hosted Cu – Fe – Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. Ore Geol Rev, 15: 177 – 242.

TRANSPORT-CHEMICAL REACTION OF GEOCHEMICAL FLUID AND MICROMECHANISM ORE-FORMING PROCESSES: A CASE STUDY FOR THE DONGGUASHAN STRATABOUND SKARN Cu DEPOSITS, ANHUI PROVINCE, CHINA

LING Qi-cong[1,2], LIU Cong-qiang[1], BAO Zheng-yu[2]

(1. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550002, *China;* 2. *China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: A dynamic model of ore-forming processes of the Donguashan strata-bound skarn copper deposit is derived from geological model on the basis of comprehensive actually geological work. Then the analytical solutions describing the evolution of ore-forming system are worked out. The ore-forming mechanism is revealed by the present study as follows: Orebodies were formed by complex dynamic processes of coupling transportation with chemical reactions of ore-forming materials (including advection, molecular diffusion and dispersion, metasomatism, and dissolution-deposition etc.). The ore-forming processes are controlled by a series of dynamic parameters of the media, such as efficient porosity, permeability. By dynamic modeling reasonable interpretation to important geological phenomena such as spatial distribution of orebodies, the spatial variation of copper grades and structures of ores can be obtained. It is demonstrated that once the values of the dynamics parameters are given, it would be possible to predict the locations, the length and width of the ore bodies as well as the variation regularities of copper grades in ores formed by a specified case. Though a number of assumptions were made that resulted in, to some extent, an idealized system, the study here provides a framework for studying the mechanics of transport in fractured porous media and as such can be regarded as the base for solutions to problems developed for this purpose. By applying the analytical solutions to field or laboratory data, they will assist in parameter identification, thus enabling prediction to be made with models of more elaborate fractured systems.

Key words: Fluid transport-chemical reaction; micromechanism of ore-forming process; strata-bound skarn deposit; Dongguashan copper deposit

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net