

文章编号:0258-7106(2002)01-0001-09

安徽月山矿田夕卡岩型矿床形成的水岩作用*

周涛发 袁峰 岳书仓 刘晓东 赵勇

(合肥工业大学资源与环境工程学院,安徽合肥 230009)

摘要 文章分析了安徽月山矿田夕卡岩型矿床形成过程中水岩作用的类型和特征。估算和讨论了水岩作用过程中的质量-体积变化和动力学问题。结论认为:水岩作用对流体成矿系统中夕卡岩和蚀变矿化作用的发生、发展,成矿流体的形成,成矿物质的富集,矿床定位等具有重要意义;水岩作用的水岩比值(W/R)小于 0.1;夕卡岩和蚀变分带是开放体系一系列溶解沉淀波反应前锋发生水岩反应后矿物和元素组合的时空分离的结果。

关键词 夕卡岩型矿床 水岩作用 流体成矿系统 动力学 月山矿田

中图分类号: P618.41;P618.51;P588.31+2

文献标识码: A

水岩作用是形成成矿流体的一个重要条件(Fyfe,1978;Barnes,1987;卢焕章,1997)。水(流体)与矿物、岩石的相互作用是近 20 年来地学领域的前沿问题(Thompson,1995;Large,1992;Lasaga et al.,1993;Steeffel et al.,1994;翟裕生,1996;张荣华等,1998)。夕卡岩型矿床形成过程的水岩作用研究也取得了重要成果(Layne et al.,1991;於崇文等,1993;1997;赵斌等,1999)。安徽月山矿田是长江中下游铜、金成矿带中具典型特色的夕卡岩-热液型铜、金矿田(常印佛等,1991)。本文在近年研究的基础上(周涛发,1993;周涛发等,1996;2000),重点讨论该矿田夕卡岩型矿床形成过程中的水岩作用,为建立矿田的夕卡岩-热液型铜、金矿床成矿流体系统的形成和演化模型提供依据。

1 矿床地质特征

月山矿田位于安徽省安庆市附近(图 1)。该区内中元古界至第四系地层出露齐全。赋矿地层主要为三叠系的月山组和南陵湖组,由白云岩、灰岩、角砾状灰岩等组成。月山岩体与铜、金成矿作用关系密切(周涛发,1993;周涛发等,1996),其岩性为闪长岩、石英二长闪长岩、石英闪长岩等。岩体受北东向和近东西向两组基底断裂控制。该矿田包括夕卡岩

型铜(铁)、金矿床和热液脉型铜(钼)、金矿床,它们皆产于月山岩体与三叠系地层局部接触带或岩体内部断裂、裂隙系统中(图 1)。

夕卡岩型矿床是该矿田内最重要的矿床类型,已发现此类矿床(点)十余处。矿床(点)均分布于闪

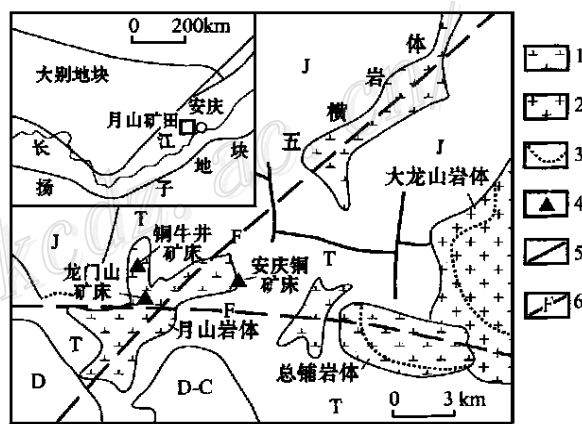


图 1 月山矿田地质简图

1—闪长岩类; 2—碱长花岗岩; 3—岩相界线; 4—矿床; 5—断层; 6—基底断裂; D—泥盆系; D-C—泥盆系-石炭系; T—三叠系; J—侏罗系

Fig. 1 Geological sketch map of the Yueshan orefield
1—Diorites; 2—Alkali granite; 3—Boundary of lithofacies; 4—Deposit; 5—Fault; 6—Base ment fault; D—Devonian; D-C—Devonian and Carboniferous; T—Triassic; J—Jurassic

* 本文由国家自然科学基金项目(编号:49802007)资助

第一作者简介 周涛发,男,1964年生,博士,教授(博士生导师),从事矿床学、岩石学、地球化学和资源环境综合评价等方面的教学和科研工作。

收稿日期 2001-02-15; 改回日期 2001-12-19。张绮玲编辑。

长质岩体(月山岩体)与三叠系中、下统月山组和南陵湖组碳酸盐岩地层(或地层捕虏体)的接触带中,呈隐伏状态产出。矿体赋存于夕卡岩体中,成矿有利部位是岩体与地层接触面大幅度内凹处,岩体呈舌状伸入碳酸盐岩层的外接触带及岩体内的地层捕虏体中。

安庆铜矿是月山矿田内最具代表性的夕卡岩型矿床。它位于月山岩体东枝前缘,沿闪长岩与大理岩的舌状体接触带分布,其形态和产状严格受近东西向断裂构造及接触面形态的控制。矿床埋深在-204~-920 m之间。矿床的矿石建造属接触交代夕卡岩型铜(金)-铁建造,矿石类型较多,主要有磁铁矿型铜矿石、夕卡岩型铜矿石、磁铁矿石和膏榴岩型矿石等,各类矿石在空间上表现出分带规律,外接触带大理岩中常为磁铁矿型铜矿石和磁铁矿石,内接触带闪长岩中常为透辉石、方柱石夕卡岩型铜矿石或闪长岩型铜矿石。矿化类型外带以铁-铜(金)矿化为主,内带以铜(金)矿化为主。与之对应,夕卡岩呈明显的带状分布,相关岩石由外带向内带依次为:大理岩、石榴子石夕卡岩带、透辉石石榴子石夕卡岩带、石榴子石透辉石夕卡岩带、透闪石夕卡岩带、斜长石透辉石夕卡岩带、透辉石方柱石夕卡岩带和透辉石化闪长岩带、闪长岩。安庆铜矿围岩接触交代及热液蚀变作用发育,热液交代蚀变具多期、多阶段的特点。围岩蚀变类型按时间大致可划分为早、中、晚3期。早期蚀变主要为方柱石化、透辉石化、石榴子石化、钠长石化、绿帘石化、透闪石-阳起石化等,和夕卡岩阶段相当;中期蚀变主要为绿帘石化、绿泥石化、硅化、碳酸盐化等,与石英-硫化物阶段相当;晚期蚀变主要为碳酸盐化、硅化、泥化、绢云母化、绿泥石化等。其中,早期蚀变常在矿体周围强烈发育,远离矿体,蚀变强度逐渐减弱。蚀变规模与矿化规模成正比。

根据矿物共生组合分析,将安庆铜矿的矿化-蚀变作用分为两期五个阶段:夕卡岩期,包括早期夕卡岩阶段、磁铁矿阶段和脉状夕卡岩阶段;石英-硫化物期,包括石英-硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段。

2 水岩作用的质量-体积变化

2.1 水岩作用的主量元素成分变化

根据月山矿田夕卡岩型矿床蚀变岩及其原岩的元素相对质量分数(周涛发,1993)和水岩作用过程

中蚀变岩石的质量和体积变化关系原理(Grant, 1986):

$$w_i^a = \frac{m^0}{m^a} (w_i^0 + \Delta w_i)$$

式中 w_i^a 为蚀变岩中 i 元素的质量分数, w_i^0 为原岩中 i 元素的质量分数, m^0 为原岩质量, m^a 为蚀变岩质量, $\Delta w_i = \Delta m_i / m^0$ 。选取元素 Ti、Al 作为蚀变过程中的惰性组分,在 w_i^a - w_i^0 图解上通过原点和惰性组分点的斜率即为 K 值(表1),同时计算了蚀变过程中各组分的得失。结果表明:在透辉石化、方柱石化等高温蚀变过程中, Ca 被大量带入,迁入量可达 54.55%~88.47%。Na 被少量带入,迁入量 12.32%~28.99%。Al 既有迁入,也有迁出,但量不大。Fe、Mg、K 大量迁出,迁出量分别为 45.42%~85.81%、49.68%~77.83%和 5.53%~68.39%。Si 少量迁出;在中低温蚀变过程中, Ca 在泥化与硅化蚀变过程中表现为迁出,迁出量分别为 27%、73.64%,而在碳酸盐化中表现为大量迁入,迁入量达 63.21%,Al 也表现出少量迁入或迁出,而 Si、Fe、Mn、Mg、K 则大量迁出,不同蚀变类型中,迁出量不同;从高温蚀变到低温蚀变过程中,岩石中的 Si、K 元素始终表现为迁出, Si 迁入到热液中,有利于提高 Au 的溶解度及金呈硅酸络合物形式进行迁移, Fe、Mn、Mg 等金属元素被大量迁入到热液中去,对成矿系统中成矿物质的进一步富集具有一定意义, Al 元素迁入量与迁出量基本相等, Ti 元素无迁入、迁出或微量迁出,可以看作惰性组份,而 Na 则表现出迁出, Ca 迁入迁出情况比较复杂。蚀变过程中,热液中的 Na、K 质量分数增大,有利于向成矿方向发展(Barnes, 1987)。因此,月山岩体闪长质岩石的蚀变过程有利于成矿流体的形成和成矿的发生。

2.2 夕卡岩形成过程中稀土元素的变化

稀土元素地球化学特征研究(Yue et al., 1998; 周涛发, 1993)表明,由闪长岩→内夕卡岩或矿石→外夕卡岩或矿石→大理岩,稀土元素总量表现为逐渐降低的趋势。若与各自原岩相比,内夕卡岩带稀土元素总量低于原岩(闪长岩),外夕卡岩带稀土总量高于原岩(大理岩)。导致这种差异的原因可能是稀土元素的带出与带入,即流体与闪长岩水岩反应过程中,闪长岩中的稀土元素向流体中转移且两者达到了平衡;流体与大理岩水岩反应过程中,流体中的稀土元素向大理岩的交代产物中转移和沉淀。夕卡岩和夕卡岩型矿石的稀土元素配分模型总体上类

表 1 月山岩体不同类型蚀变岩石体积增量

Table 1 Volume variations of rocks after alteration of diorites in Yushan intrusion

编号	蚀变分类	蚀变岩石类型	浓度线斜率 K	蚀变岩石体积增量 ΔV
1	高温蚀变	透辉石化闪长岩	1.011	0.011
2	高温蚀变	方柱石化闪长岩	1.077	0.071
3	中低温蚀变	硅化闪长岩	1.291	0.225
4	中低温蚀变	碳酸盐化闪长岩	1.000	0
5	中低温蚀变	泥化闪长岩	1.301	0.231

似于闪长岩体的稀土元素配分模型,如负铕异常相似,均为小的负异常,轻稀土元素富集,而和大理岩的稀土配分模型区别很大。通常,交代成因夕卡岩 REE 分配模型主要受到岩体、碳酸盐地层及流体中 REE 丰度和分配行为控制,由于中酸性岩体中的 REE 丰度一般比碳酸盐地层中的高几倍至几个数量级,所以如果是同一类型热液流体作用于岩体,则交代成因夕卡岩中 REE 分布几乎完全承袭岩体中 REE 分布模式。因此,夕卡岩、夕卡岩型矿石和闪长岩体的 REE 配分模型的一致性,反映了与之有关的热液流体应属同一种类型。研究还显示,由石榴子石组成的夕卡岩全岩的 REE 配分模型与石榴子石单矿物的配分模型相似(赵斌,1999),说明控制岩石中稀土元素丰度和配分模型的主要因素包括其组成矿物的种类、质量分数及其热液性质。

稀土元素总量从内带到外带有规律地减少(Yue et al.,1998;周涛发,1993),夕卡岩中石榴子石以富集轻稀土为特征及夕卡岩、矿石与闪长岩体的配分模型总体的一致性,说明夕卡岩是由岩浆热液为主要流体的水岩作用形成的,安庆铜矿的夕卡岩属于接触交代成因。

2.3 岩体水岩作用后的体积变化

岩石成分变化与体积变化的密切关系,可以应用成分变化来计算水岩作用后岩石体积变化。通过改进 Grant(1986)等浓度法,用微量元素计算体积变化(ΔV):

$$\frac{c_i^a}{c_i^0} = \frac{1}{(1 - \Delta V)}$$

其中, c_i^a/c_i^0 为等浓度线的斜率, $\Delta V > 0$ 表示扩容, $\Delta V < 0$ 表示体积亏损, $\Delta V = 0$ 表示体积不变。月山岩体在各种蚀变过程中的体积变化计算结果如表 1 所示。结果表明,高温蚀变后,体积有微小的扩大,不到 8%。因此在高温条件下,闪长岩体发生蚀变后体积变化可忽略不计;而中低温蚀变后,除碳酸盐化闪长岩体积几乎无变化外,其他两种蚀变闪长岩发

生了明显的扩容,体积增量超过了 20%。中低温条件下,扩容的结果可能为岩体内矿质的沉淀提供了一定的场所。

3 水岩作用动力学

3.1 流体性质与水岩作用的流体动力学参数

蚀变矿化是含矿热液对岩石进行交代反应的产物。在水岩反应过程中,热液交代已固结的闪长质岩石和围岩,不仅使岩石成分变异,流体本身成分亦发生变化。前文的蚀变带地球化学研究表明,矿化蚀变后的流体将逐渐富集 Na^+ 、 K^+ 、 Si^{4+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,而其中的 Al、Ti 元素浓度基本未变。流体包裹体成分研究(周涛发等,2000)表明,热液流体中 Cl 离子浓度大于 F 离子浓度,Cl 是重要的金属络合物配位体。安庆铜矿夕卡岩阶段的成矿流体中 SO_4^{2-} 浓度较高, $w(\text{SO}_4^{2-})/w(\text{F}^- + \text{Cl}^-) = 1.93$,表明硫的水溶物种在成矿物质的迁移搬运过程中亦起了较为重要的作用。流体包裹体液相成分中阳离子主要为 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,且 $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, $\text{Cl}^- > \text{F}^-$, $\text{Na}^+/\text{K}^+ > 1$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} > 1$,当流体中离子浓度大小顺序按上述排列时,流体成分对成矿特别有利(Barnes,1987)。流体中离子组合类型为 $\text{Cl}^- - (\text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Ca}^{2+}$ 型。流体包裹体气相成分均以 H_2O 和 CO_2 为主,不含 O_2 ,且 $w(\text{CO}_2)/w(\text{H}_2\text{O})$ 比值非常小,还原参数中等。

成矿热液的动力学参数是指一些表示热液物理特征的参量,例如成矿热液的密度、粘度系数、扩散系数、比热容、热膨胀系数等,它们对定量讨论水岩作用和成矿作用动力学过程具有重要意义。利用所测定的包裹体成分资料(周涛发等,2000),依据成矿流体的 NaCl 的水溶液模型(Helgeson et al.,1984)和理论公式(Ferry et al.,1992;於崇文,1993),计算得月山矿田中各成矿阶段的热液的流体动力学参数(表 2)。

表2 月山矿田夕卡岩型矿床热液流体的动力学参数

Table 2 Dynamic parameters of hydrothermal solution in skarn ore deposits of the Yueshan orefield

成矿阶段	$\theta/^\circ\text{C}$	$w(\text{NaCl})_{\text{eq}}/\%$	粘度/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}) \times 10^{-5}$	热导率/ ($\text{Wm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	定压比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热膨胀系数/ ($10^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)
夕卡岩阶段	570	26.0		1.1023	2439	
磁铁矿阶段	510	29.2		1.0374	2464	
石英-硫化物阶段	350	23.9	12.74	0.804	3208	1.03
石英-碳酸盐阶段	205	8.6	16.93	0.703	3853	0.84

注:表中温度为校正后的均一温度平均值。

3.2 水岩体系中岩石物理性质

3.2.1 地层岩石的渗透率和孔隙率

月山矿田三叠系各类岩石的孔隙率和渗透率实验测试结果表明,水岩反应体系中,灰岩孔隙率和渗透率较低,不利于流体渗透输送;白云岩孔隙率和渗透率相对较高,孔隙率一般为4.74%~12.91%,渗透率属中等强度,为0.7%,因此,白云岩有利于成矿流体渗滤、运移,并伴随着水-岩石反应而产生交代蚀变带,该过程中,由于流体物化条件发生变化,促使矿质沉淀,成为矿床的主要赋矿岩石。

3.2.2 岩石的力学性质

对安庆铜矿400 m中段的闪长岩和大理岩的力学实验^①结果表明,月山岩体闪长岩比大理岩有更高的弹性模量(E)和抗压强度值(F),其中,闪长岩的 E 值为 $5.12 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, F 值为 3.025 kg/cm^2 ;大理岩的 E 为 $4.63 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, F 为 2.578 kg/cm^2 ,闪长岩比大理岩有更高的弹性,但两者都在低弹性体范围内 [$E = (3 \sim 7) \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$]。在区域构造应力场作用下,大理岩更易裂碎或形成角砾岩,闪长质岩石发生塑性变形或产生微裂隙。接触带大理岩中大量裂隙的产生,更有利于大规模的流体渗透和物质的迁移,也会促使大气降水与岩浆热液相混合。在闪长质岩石变形的过程中矿物的重结晶作用会导致矿物的细粒化,这也提高了岩石的孔隙度和渗透率,从而有利于周围的流体进入变形区,并且在压力梯度作用下沿矿物颗粒边界渗透和扩散,导致相关的一系列水岩作用的发生。

因此,三叠系月山组白云岩大的渗透率、孔隙率及接触带附近闪长质岩石和大理岩力学性质的差异均能促使大规模的成矿流体的运移,在接触带附近的两类岩石物理性质均有利于水岩作用和成矿作用的发生。

3.3 多孔介质水岩反应体系中流体的运动方式

水-岩反应体系中化学反应最终趋于平衡,使得流体的成分不再随时间而变化,因而流体失去反应活性,而只有保持反应活性的流体在成矿过程中可以携带矿质离开源区参与成矿。因此,流体中物质迁移的发生必须限定在一定的时间即临界驻留时间之内(於崇文等,1993)。流体在孔隙系统中流动,其临界驻留时间可由下式求出:

$$t = \frac{1000 Q_s \beta \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{3 R \eta (1 - \beta)} \quad (1)$$

式中 Q_s 为溶液中元素平衡浓度, R 为反应固相的离解速率, η 为反应矿物在岩石中的体积比, r 为矿物颗粒粒径; β 为岩石孔隙率。临界驻留时间常以岩石中的 K^+ 、 Ca^{2+} 等常量组分计算(於崇文等,1993)。依据该原理,以体系中的微量组分铜元素为例来近似计算其在热液中的驻留时间。据区域地质和矿床地质资料(周涛发,1993),矿化蚀变岩石的 β 为4.74%~12.91%,黄铜矿在矿石中占6.43%,即 $\eta = 0.0643$,统计表明,黄铜矿的粒径多半在0.074 m m左右;在 $\theta = 300^\circ\text{C}$ 时的成矿流体中铜的溶解度 $m_{\Sigma\text{Cu}}$ 可由热力学方法确定,为几种主要络合物浓度之和: $m_{\Sigma\text{Cu}} \approx m_{\text{CuCl}_2} + m_{\text{CuCl}_2^-} + m_{\text{CuCl}} + m_{\text{CuClOH}}$ (周涛发等,2000),计算表明流体中铜元素浓度 $m_{\Sigma\text{Cu}}$ 为 $10^{-3.5} \text{ mol/L}$ 。另据谭凯旋等(1994)实验得出黄铜矿的溶解速率常数 $\lg R = -4.6604 - 2300.80/\theta$ ($^\circ\text{C}$),因此,黄铜矿在 $\theta = 300^\circ\text{C}$ 时的溶解速率常数 $R = 10^{-11} \text{ mol/L}\cdot\text{s}$ 。把以上数值代入(1)式,计算得出流体中铜元素的临界驻留时间 $t = (1.223 \sim 3.331) \times 10^9 \text{ s} = 38.8 \sim 106 \text{ a}$ 。

成矿流体中成矿元素的扩散作用是一种重要的质量迁移方式,当流体内组分浓度不均匀时,该元素在浓度梯度的驱动下,将自高浓度处向低浓度处迁

① 安徽326地质队,1990.安徽省安庆地区成矿条件及铜金铁成矿预测.科研报告.

移,产生物质传递。在流体饱和孔隙介质中,物质迁移的特征距离 x 可以用一个简化的式子来计算 (Ferry et al., 1992):

$$x \approx \sqrt{\beta \cdot D_f \cdot t} \quad (2)$$

式中 β 为孔隙率, D_f 为扩散系数, t 为物质迁移持续时间(临界驻留时间)。对于热液中以络合物形式迁移的元素,根据离子独立移动定律,其极限离子当量电导可以认为是组成离子的极限离子当量电导之和,计算的安庆铜矿成矿流体中几种主要铜、金的络合物分别在 300 °C 和 250 °C 时的扩散系数如表 3 所示。

将临界驻留时间 t 、多孔介质的空隙率 β 及络合物物种的扩散系数 D_f 值带入(2)式,可计算在成矿主阶段(300 °C、250 °C)时 Cu、Au 的络合物在流体中迁移的可能距离 x 。计算结果表明,由扩散作用所引的 Cu、Au 元素迁移距离均小于 10 m(表 3)。

若离子的扩散系数较小,可忽略不计,多孔介质中流体的流动可视纯渗滤作用。在线性等温线的纯渗滤作用中,渗滤距离 Z_f 可由下式表示 (Fletcher et al., 1974):

$$Z_f = \beta \cdot v \cdot t \quad (3)$$

式中 β 为孔隙率, v 为达西渗透速率, t 为物质迁移持续时间。

把 $\beta = 4.74\% \sim 12.91\%$, $v = 4.43 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, $t = (1.223 \sim 3.331) \times 10^9 \text{ s}$ 代入上式,可计算出成矿元素铜、金在流体中由于纯渗滤作用引起的迁移距离大约为 15.4 ~ 122.3 m,明显大于 10 m,即远远大于由扩散作用所引起的物质迁移距离。

根据矿床地质资料,安庆铜矿 I 号矿体最大厚度 114 m,最小厚度 1.5 m,厚度平均 28 m; II 号矿体一般厚 15 ~ 40 m,最大厚度 48 m,平均厚 19.4 m; 而其余小矿体厚度很小,均小于 10 m。矿体的厚薄应与成矿时流体中成矿元素迁移能力有关。在接触带附近,若成矿元素迁移距离远,则形成矿体的厚度

大;若元素迁移能力差,则形成矿体的厚度薄。I 号和 II 号矿体的平均厚度均大于 10 m,说明成矿元素铜、金的迁移机制不应为扩散作用,但渗滤作用引起铜、金元素迁移的距离可达 15.4 ~ 122.3 m,故形成夕卡岩型矿床主矿体的成矿元素铜、金在流体中的主要迁移方式为渗滤作用。而形成其它小矿体的成矿元素在流体中的主要迁移方式可能为扩散作用。

因此,夕卡岩型矿床水岩作用过程中,若水岩体系中成矿元素的主要迁移方式为渗滤作用,则形成大规模的主矿体;若成矿流体中的铜、金等金属元素以扩散作用作为其迁移的主要方式,则形成一些规模小的矿体。水岩体系中金属元素以渗滤作用迁移是本区形成大型矿体的必要条件。

3.4 水岩作用的化学和动力学过程

以上研究表明,月山矿田的夕卡岩和相关蚀变岩石矿石主要是以渗滤交代作用为主形成的,水岩作用和成矿的流体为岩浆水和部分大气降水的混合(周涛发等,1996)。由熔流分离作用产生的流体在上移的过程中,与接触带附近的闪长岩体发生水岩反应,使闪长岩体在高温下发生方柱石化、透辉石化和钠长石化,形成内交代蚀变带;在外接触带围岩中,白云岩的孔隙度大于灰岩,因此流体优先进入白云岩的裂隙中,和白云岩发生交代反应并生成透辉石、石榴子石。由于夕卡岩的形成是水-岩作用逐渐地向两侧扩展而取得自身的赋存空间,而不是裂隙通道形成一定宽度后再进行充填的,因此,相当数量的流体也能与孔隙度小的灰岩发生交代反应。

夕卡岩矿物成分和夕卡岩化学组成受原岩化学成分、介质 pH 值、氧化-还原条件、温度及压力等因素的综合影响。安庆铜矿床夕卡岩阶段的介质环境为偏碱-中性条件(周涛发等,2000),围岩为中酸性岩浆岩(闪长岩)和白云质灰岩,根据赵斌(1983)对夕卡岩形成的物化条件实验研究,这种环境下形成的夕卡岩矿物应以钙铁榴石和透辉石为主,这与实

表 3 金属络合物在 300 °C 和 250 °C 下的扩散系数和迁移距离

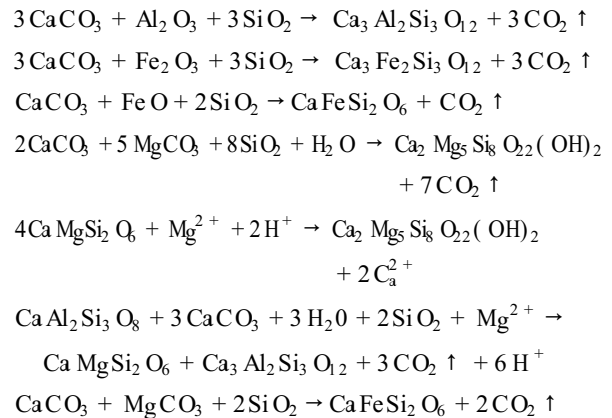
Table 3 Diffusion parameters and transport distance of metallic complexes at 300 °C and 250 °C

络合物	扩散系数(300 °C时) ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times 10^{-8}$)	迁移距离/m	络合物	扩散系数(250 °C时) ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times 10^{-8}$)	迁移距离/m
CuCl_2^-	8.199	2.2 ~ 5.9	$\text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$	8.714	2.3 ~ 6.1
CuCl_3^{2-}	11.271	2.6 ~ 7.0	$\text{Au}(\text{HS})^{2-}$	5.42	1.8 ~ 4.8
CuCl	5.127	1.7 ~ 4.7	AuHS	3.58	1.4 ~ 3.9
CuClCH	8.727	2.2 ~ 6.1	AuH_3SiO_4	5.21	1.7 ~ 4.7

注:在计算金元素迁移距离时,临界驻留时间以铜元素的临界驻留时间代替。

实际情况是相符的。安庆铜矿夕卡岩阶段矿物中的流体包裹体液相成分中, Mg^{2+} 的浓度为 0.0056 mol/L (周涛发, 1993), 表明在发生熔-流分离过程后的岩浆热液中, 镁的浓度应大于 10^{-3} mol/L , 且随着闪长质岩体的蚀变, 其中的部分镁也进入到流体中, 因此在接触带的流体是较富镁的 ($>10^{-3} \text{ mol/L}$)。中酸性闪长质岩石、多孔的白云质灰岩, 较富 Mg 偏碱性流体共同制约着外带夕卡岩中的矿物成分。

月山矿田蚀变分带和矿化分带是成矿流体在多孔岩石中流动时与岩石之间发生水岩作用的结果, 热液蚀变矿化分带实质上是一种“运输-反应问题”(於崇文等, 1997)。月山矿田夕卡岩型矿床成矿流体中组分主要运输方式为渗滤作用, 且流体相和固体相之间的作用主要为溶解-沉淀作用, 阳离子的交换-吸附作用是次要的, 因此, 夕卡岩型矿床中夕卡岩的分带是一种渗滤交代分带。流体在多孔介质中不断流动的过程是流体和岩石中化学组成的浓度不断发生改变的过程, 这种化学组成的浓度改变称为“化学波”, 又称“溶解-沉淀波”(Bryant, 1986; 於崇文等, 1997)。月山矿田中的矿化蚀变分带实质上是溶解-沉淀波在可渗透介质中的形成和传播的结果。在接触带附近月山岩体一侧, 由于入注的流体和下渗的大气降水混合, 造成入注成矿溶液(多组分耦合系统)中多种相干溶质发生浓度变化, 即产生非相干波(扰动)。非相干波分解成若干相干波(波中所有化学物种的浓度以同一速度移动), 相干波(交代前锋)在从月山岩体一侧(下游)向围岩一侧方向(上游)运移的过程中, 其速度递减, 并以常速移动。当扰动的流体发生水岩作用时, 流体相中不发生化学反应的物种如铜的氯化物络合物可以无阻碍地通过多孔岩石, 这时流体相中氯化物的浓度变化形成了“盐度波”, 它在下游的最前方以入注流体的比速传播, 但反应物物种的移动随着从月山岩体一侧向接触带方向上的化学反应程度的逐渐增强而受到愈来愈大的阻碍, 从而在盐度波之后形成了一系列速度递减的溶解-沉淀波(相干波, 比速 <1), 直至下游的最后方出现以入注流体初始成分的浓度变化所形成的溶解波, 并以最低的速度传播。在盐度波和溶解波之间所形成的各种溶解-沉淀波随着反应前锋的运移, 分别沉淀出各种主要的夕卡岩矿物, 在“盐度波”后面依次沉淀出的矿物为石榴子石、辉石、透闪石、斜长石、方柱石及透辉石, 各夕卡岩矿物生成反应方程式分别如下:



溶解-沉淀波运移速度不同反映了在水岩反应前锋的运移速度不同, 整个夕卡岩带中各个分带序列随着交代前锋的移动而逐渐地按比例地发展和扩大, 但在同一交代前锋中物种(分子、离子)速度落后于浓度速度(波速), 且物种速度在同一方向上彼此相伴并以同速行进, 从而导致了同一分带序列中特定的矿物和元素组合。因此, 从月山岩体一侧向接触带方向移动的交代反应前锋以递减的常速移动, 特定的矿物和岩石组合不断地出现, 形成了夕卡岩的分带。根据溶解-沉淀波依次沉淀出的矿物, 月山矿田夕卡岩型矿床从岩体一侧到围岩一侧(从内到外), 将会出现以下几个分带序列(图2): R^0 代表最下游的闪长岩, R^1 、 R^2 、 R^3 、 R^4 、 R^5 、 R^6 和 R^7 分别代表透辉石化闪长岩带、透辉石方柱石夕卡岩带、斜长石透辉石夕卡岩带、透闪石夕卡岩带、石榴子石辉石夕卡岩带、辉石石榴子石夕卡岩带和石榴子石夕卡岩带。这7个带构成了本矿田夕卡岩型矿床交代分带的时空结构。矿床中夕卡岩的分带实际上是矿物和元素组合的时空分离的结果, 是流体的渗滤速度、流体相内的均相反应速率、流体-岩石(水-岩)间多相反应速度、溶解-沉淀波的波速和物种速度等因素综合作用的反映。

根据同位素平衡交换模式(Taylor, 1977)、热液化学模式和月山矿田夕卡岩型矿床的地质地球化学研究结果, 计算的夕卡岩型矿床形成的水岩比值(W/R)小于0.1。利用热平衡交换模式(Criss, 1986)计算表明, 夕卡岩型矿床形成过程中的水岩交换并不是在封闭体系中进行的, 而是在开放体系中完成的。随水-岩反应的发生和发展, 流体中的组分浓度变化速率非常大, 流体中组分浓度随流体的演化而不断的发生改变, 在时间和空间上会存在巨大的差异。浓度梯度进一步促使流体流动并与岩石发生交代反应。

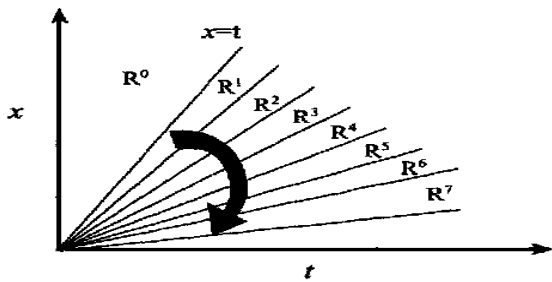


图 2 月山矿田夕卡岩型矿床溶解-沉淀波及分带示意图
(据 Bryant et al., 1986 修改)

图中箭头方向表示分带的顺序由岩体一侧向围岩一侧发展,
 $R_1 \sim R_7$ 表示整个夕卡岩带中具有特定元素组合的各个分带序
列。 x 代表无量纲空间距离, t 代表无量纲时间

Fig. 2 Schematic diagram of dissolution and
deposition waves and zoning for of skarn type
ore deposits in Yushan ore field

4 主要结论

(1) 月山矿田夕卡岩型矿床形成过程中,月山岩体经历了由高温至低温交代蚀变的水岩作用过程,热液中 Si、K、Fe、Mn、Mg 等元素浓度增加,水岩作用对成矿流体的形成及成矿系统中成矿物质的进一步富集具有重要意义,为成矿作用的发生提供了有利条件。

(2) 夕卡岩是由岩浆热液为主的流体成矿系统的水岩作用引起的,安庆铜矿的夕卡岩属于接触交代成因。闪长岩体在发生高温蚀变后体积变化不大,发生中低温蚀变后,除碳酸盐化外,岩石发生了明显的扩容,后者为矿床定位提供了部分空间。

(3) 月山矿田的三叠系月山组地层及闪长质岩石的岩石物理性质的差异能促使大规模的成矿流体运移,并在接触带附近发生水岩作用和成矿作用。水岩体系中成矿元素的主要迁移方式为渗滤作用,这也是大型主矿体形成的必要条件。

(4) 矿床中夕卡岩和矿化蚀变的分带是矿物和元素组合的时空分离的结果,是流体的渗滤速度、流体相内的均相反应速率、流体-岩石(水-岩)间多相反应速度、溶解-沉淀波的波速等因素综合效应的反映。水岩比值 (W/R) 小于 0.1,且水岩反应是在开放体系中进行的。水岩体系中,组分的浓度梯度可促使流体流动以及水岩反应的进一步发生。

References

- Barnes H L. 1979. Geochemistry of hydrothermal ore deposits [M]. John Wiley & Sons. 382 ~ 460.
- Bryant S L, Schechter R S and Lake L W. 1986. Interactions of precipitation/dissolution waves and ion exchange in flow-through permeable media [J]. *AIChE J*, 32(5): 751 ~ 764.
- Chang Y F, Liu, X P and Wu Y C. 1991. The copper-iron belt of the Middle and Lower reaches of the Yangtze River [M]. Geological Publishing House, Beijing, China. 1 ~ 379 (in Chinese).
- Craig E M. 1994. The solubility of quartz in H_2O in the lower crust and upper mantle [J]. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 58(22): 214 ~ 232.
- Criss R E, Taylor and H P Jr. 1986. Meteoric-hydrothermal system [J]. *Reviews in Mineralogy*, 16: 373 ~ 422.
- Ferry J M and Dipple G M. 1992. Models for coupled fluid flow, mineral reaction, and isotopic alteration during contact metamorphism: the Notch Peak Aureole, Utah [J]. *American Mineralogist*, 77: 577 ~ 591.
- Fletcher R C and Hoffman A W. 1974. Simple model of diffusion and combined diffusion-infiltration metasomatism [A]. In: Hoffman A W, Giletti B J, Yoder H S eds. *Geochemical transport and kinetics* [C]. Carnegie Institute of Washington, 243 ~ 259.
- Fyfe W S, Price N J and Thompson A B. 1978. Fluid in the Earth's crust [M]. Elsevier scientific publishing company. 383.
- Grant J A. 1986. The isocon diagram: a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration [J]. *Econ. Geol.*, 81: 1976 ~ 1982.
- Helgeson H C, Murphy W M and Aagaard P. 1984. Thermodynamic and kinetic constraints on reaction rates among minerals and aqueous solution, II. Rare constraints, effective surface area, and the hydrolysis of feldspar [J]. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 48: 2405 ~ 2432.
- Large R R. 1992. Australian volcanic hosted massive sulfide deposits: features, styles and genetic models [J]. *Econ. Geol.*, 87: 471 ~ 510.
- Lasaga A C and Rye D M. 1993. Fluid flow and chemical reaction kinetics in metamorphic system [J]. *Am. J. Science*, 293: 361 ~ 404.
- Layne G D and Spooner E T C. 1991. The JC tin skarn deposit, southern Yukon territory: I. Geology, paragenesis, and fluid inclusion microthermometry [J]. *Econ. Geol.*, 86: 29 ~ 47.
- Lu H Z. 1997. Ore-forming fluids [M]. Beijing: Science and Technology Publishing House. 1 ~ 210 (in Chinese).
- Starostin V L. 1996. Fluid dynamics of ore deposits [J]. *Frontier of Earth Science*, 3(3): 9 ~ 17.
- Steeffel C I and Lasaga A C. 1994. A couple model for transport of multiple chemical species and kinetic precipitation/dissolution reactions with application to reactive flow in single phase hydrothermal systems [J]. *Am. J. Science*, 294: 529 ~ 592.
- Tan K X. 1994. Dissolving kinetics of chalcocite, chalcopyrite and bornite in 2 mol/L NaCl solution [J]. *Bulletin of Chinese Science*, 39

- (23) : 2165 ~ 2168 (in Chinese with English abstract) .
- Taylor H P. 1977. Water/ rock interactions and the origins of H₂O in granitic batholiths [J]. *J. Geol. Soc.* , 133 , 505 .
- Thompson J F H. 1995. Magma , fluids and ore deposits [M]. *MAC short course* . 23 , 525 .
- Yu C W, Chen K, Bao Z Y, et al. 1993. Dynamics of hydrothermal metallogenesis [M]. *Wuhan: Publishing House of Chinese University of Geoscience* . 1 ~ 310 (in Chinese) .
- Yu C W, Chen K, Bao Z Y, et al. 1997. Dynamics of metallogenesis [M]. *Beijing: Geological Publishing House* . 1 ~ 230 (in Chinese) .
- Yue S C and Zhou T F. 1998. REE and stable isotope geochemical systematics of copper deposits in Yushan, Anhui Province, China [A]. In: Obermiller N ed. *Proceedings of the Ninth Quarrennial IAGOD Symposium [C]*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 277 ~ 301 .
- Zhai Y S. 1996. On tectonics-fluid-metallogenesis [J]. *Frontier of Earth Science* , 3(3-4) : 230 ~ 236 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang R H, Hu S M, Tong J C, et al. Kinetics of mineral-fluid reactions in open-system [M]. *Beijing: Science Publishing House* . 1 ~ 248 (in Chinese) .
- Zhao B, Zhao J S and Liu H C. 1999. Geochemistry of REE of calcareous rocks for Cu(Au) , Cu-Fe(Au) and Fe deposits in the middle and lower reaches of the Yangtze River area [J]. *Geochemistry* , 28(2) : 116 ~ 125 (in Chinese with English abstract) .
- Zhao B, Li T J and Li S P. 1983. Experimental studies on physicochemical conditions of skarn [J]. *Geochemistry* , 9(3) : 256 ~ 266 (in Chinese with English abstract) .
- Zhou T F and Yue S C. 1996. Isotope geochemistry of copper mineralization in Yueshan, Anhui [J]. *Mineral Deposits* , 15 : 349 ~ 356 (in Chinese with English abstract) .
- Zhou T F, Liu X D, Yuan F, et al. 2000. Complexes of transport and depositional physicochemical conditions of copper, gold in hydrothermal solutions of the Yueshan mineral belt, Anhui province [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 16 : 551 ~ 558 (in Chinese with English abstract) .
- Zhou T F. 1993. The genesis of diorites and related Fe-Cu deposits in Yueshan area of Anhui province: Unpublished PhD thesis [D]. Hefei: Hefei University of Technology, China. 1 ~ 192 (in Chinese with English abstract) .

附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带 [M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 379 .
- 卢焕章. 1997. 成矿流体 [M]. 北京科学技术出版社. 66 ~ 78 .
- 谭凯旋. 1994. 2 mol/L NaCl 溶液中辉铜矿、黄铜矿和斑铜矿的溶解动力学 [J]. *科学通报* , 39(23) : 2165 ~ 2168 .
- 张荣华, 胡书敏, 童建昌, 等. 1998. 开放体系矿物流体反应动力学 [M]. 北京: 科学出版社. 1 ~ 248 .
- 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 1993. 热液成矿作用动力学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1 ~ 310 .
- 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 1997. 成矿作用动力学 [M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 230 .
- 翟裕生. 1996. 关于构造-流体-成矿作用研究的几个问题 [J]. *地学前缘* , 3(3 ~ 4) : 230 ~ 236 .
- 赵斌, 赵劲松, 刘海臣. 1999. 长江中下游地区若干 Cu(Au) 、Cu-Fe(Au) 和 Fe 矿床中钙质夕卡岩的稀土元素地球化学 [J]. *地球化学* , 28(2) : 116 ~ 125 .
- 赵斌, 李统锦, 李昭平. 1983. 夕卡岩形成的物理化学条件实验研究 [J]. *地球化学* , 9(3) : 256 ~ 266 .
- 周涛发, 岳书仓. 1996. 月山地区铜成矿作用同位素地球化学研究 [J]. *矿床地质* , 15(4) : 341 ~ 350 .
- 周涛发, 刘晓东, 袁峰, 等. 2000. 安徽月山矿田成矿流体中铜金的迁移形式和沉淀的物理化学条件 [J]. *岩石学报* , 16(4) : 551 ~ 558 .
- 周涛发. 1993. 安徽月山地区闪长岩类及铜矿床的地球化学研究 [D]. 导师: 岳书仓. 合肥: 合肥工业大学. 192 .
- Barnes H L. 1987. 热液矿床地球化学 [M]. 北京: 地质出版社. 150 ~ 210 .

Water/ rock Interaction During Formation of Skarn-type Deposits in Yueshan Orefield, Anhui Province

Zhou Taofa, Yuan Feng, Yue Shucang, Liu Xiaodong, Zhao Yong

(Department of Resource and Environmental Science, Aefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract

The Yueshan orefield is a typical skarn-hydrothermal Cu- Au orefield in the Middle and Lower Yangtze Valley metallogenic belt. The skarn rocks and ores in the skarn ore deposits show spatial zoning. Wall-rock alterations are well developed around the orebodies. Their formation can be subdivided into three stages: the early stage, comprising scapolitization, diopsidization, garnatization, albitization, zoisitization, tremolitization and

actinolitization; the middle stage, composed of epidotization, chloritization, silicification and carbonization; the last stage, consisting of carbonization, silicification, argillation, sericitization and chloritization. Analyses in this paper indicate that the skarn rocks are metasomatic ones formed by the water-rock interaction between the magmatic dominant fluids and the wall rocks. In the ore-forming process of the skarn ore deposits, the Yueshan intrusive body underwent alteration through high to lower temperature of water-rock interaction processes. The concentrations of such elements as Si, K, Fe, Mn and Mg got higher in the hydrothermal solution during alteration, which seems to be of great importance in the enrichment of ore-forming material in the fluid ore-forming system. There were no sharp changes in the volume of dioritic rocks after the high temperature alteration; nevertheless, after the low to moderate temperature alteration, except carbonization, the rock volume increased over 20 percent, and some space was thus provided for the location of orebodies. Infiltration is the major transportation form of the ore-forming elements, and is also a necessary condition for the formation of large-size orebodies. The zonal structures of skarn rocks, mineralizations and alterations are products of time-space separation of the mineral and element associations through a series of dissolution-deposition reactions, and also a reflection of complex results of such processes or factors as the fluid infiltration velocity, the rate of homogeneous phase reactions, the rate of multiphase reactions, and the velocity of dissolution and deposition waves during the water-rock interaction. The water-rock ratios in this orefield were lower than 0.1, and the water-rock interactions took place in an open fluid system. The concentration gradient accelerated the fluid migration and the further water-rock interaction.

Key Words: skarn ore deposits, water-rock interaction, fluid ore-forming system, dynamics, Yueshan ore field

按学科分类的显示度《矿床地质》在地学类期刊中排名第五

据“科学时报”2002年1月22日报道,由中国科学院自然科学编辑研究会承担、中国科学引文数据库协助完成的“自然科学学术期刊评价指标体系”研究项目通过评审。该项研究是以中国自然科学学术期刊为评价对象,经大量研究,结合中国学术期刊实际情况,对一些现有评价指标做了必要、合理的修正,经大样本统计分析以及反复验证和试用完成的。评价体系包括2个系列、2项水平、3个层次和19项评价指标。强调了指标测定内容与学术质量的相关性。运用11个文献计量指标,根据中国科学引文数据库1999年的数据,经加权统计和综合计算后,得到我国自然科学学术期刊按学科分类的显示度排序,《矿床地质》在地学类期刊的排名为第5名(表1)。

表 1 地学类期刊显示度排名表

期刊名称	位次
地球物理学报	1
第四纪研究	2
地质学报	3
地理学报	4
矿床地质	5
岩石学报	6
地质论评	7
地学前缘	8
地球化学	9
气象学报	10