

文章编号: 0258-7106 (2001) 03-0259-06

下庄铀成矿古水热系统排泄区 (减压区) 铀成矿作用研究*

刘金辉 李学礼

(华东地质学院, 江西抚州 344000)

提 要 形成于古水热系统排泄区(减压区)的下庄花岗岩型铀矿床是地下热水与岩石相互作用的产物。矿物流体包裹体水文地球化学分析表明,成矿期铀成矿古热水溶液气体成分主要为 CO_2 , 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{F}\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{F}\text{-K}$ 型。地球化学模式和热力学计算证明,热水溶液中铀的存在形式为 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$, UO_2F_3^- 和 $\text{UO}_2\text{F}_4^{2-}$ 。热水溶液深循环过程中 CO_2 的加入可使溶液铀沉淀临界电位值($E_{\text{hc,U}}$)明显降低,从而保持水-铀比电位值($\Delta E_{\text{h,w,U}}$)为正值($\Delta E_{\text{h,w,U}} = E_{\text{h,w}} - E_{\text{hc,U}}$),使铀在深部相对还原的条件下仍能稳定迁移。当富铀成矿热液进入减压排泄区时,由于溶液物理-化学条件的改变,发生 CO_2 脱气作用和中和还原作用,导致 $\Delta E_{\text{h,w,U}}$ 小于零,使铀沉淀、富集,最终形成花岗岩型铀矿床。

关键词 古水热系统 排泄区 水-铀比电位值 CO_2 脱气 铀矿床

中图分类号: P619.14

文献标识码: A

1 下庄铀矿田地质背景

下庄矿田是我国最大的花岗岩型铀矿床,位于中国东南部晚加里东隆起带上的贵东花岗岩体东部。该隆起带属华南板块的一部分,经历了新元古代—早古生代地槽沉积时期、晚古生代地台沉积时期和中、新生代地台活化时期。

1.1 岩浆岩

下庄矿田所在的贵东岩体属燕山多期多阶段形成的、由不同岩性系列组成的复式岩体,具有岩浆分异完善、构造发育、热液活动强烈、铀矿化明显等特点。矿田围岩主要为古生代地层且与岩体呈侵入接触关系。与成矿较为密切的燕山期岩浆活动发生在早侏罗世到晚白垩世时期(194~105 Ma)。侏罗纪发育有 3 期 5 个岩浆侵入阶段所形成的花岗岩系列,晚白垩世形成中基性岩脉。

1.2 构造

下庄矿田地质构造以断裂为主,具有长期、多期、多次活动的特点。铀矿床的形成与矿田内特定的构造环境有关。矿田位于 NNE 向黄陂石英断裂带和马屎山断裂带所夹持的范围内(图 1)。这两条

构造分别控制了矿田北部和南部边界,是矿田内两条主要的断裂构造。近 EW 向(或称 NWW 向)和 NNE 向断裂是矿田内导矿、储矿的主要构造。来自补给区经深循环加热的成矿溶液沿近东西向构造进入矿田后,再沿 NNE 向断裂由深部上升到地表。因而,近 EW 向构造与 NNE 向构造的交汇部位即是铀矿床的分布位置。矿田内密布的不同方向断裂构造,不仅为成矿古热水流体的形成、运动提供了良好的通道,也为铀的沉淀富集作好了空间上的准备。

1.3 矿化和水热蚀变

下庄矿田主要矿化类型有沥青铀矿-灰色微晶石英型,沥青铀矿-红色微晶石英型,沥青铀矿-黑色微晶石英-紫黑色萤石型和沥青铀矿-浅红色方解石型。成矿期水热蚀变有:硅化、黑云母化、白云母化、绿泥石化、绢云母化、赤铁矿化和碳酸盐化。

2 热水溶液的水文地球化学特征

从补给区到排泄区进行深循环的古地下热水是一个化学成分极为复杂和多变的化学溶液,在其运动过程中,水和岩石中的各种物质组分经历了各种复杂的变化过程。如水-岩同位素发生分馏交换,水

* 本文得到核工业地质局核科学基金(编号: Y11218910901)的资助。
第一作者简介 刘金辉,男,1961 年生,教授,从事地热学研究工作。
收稿日期 2000-06-04; 改回日期 2001-03-06。李 岩编辑。

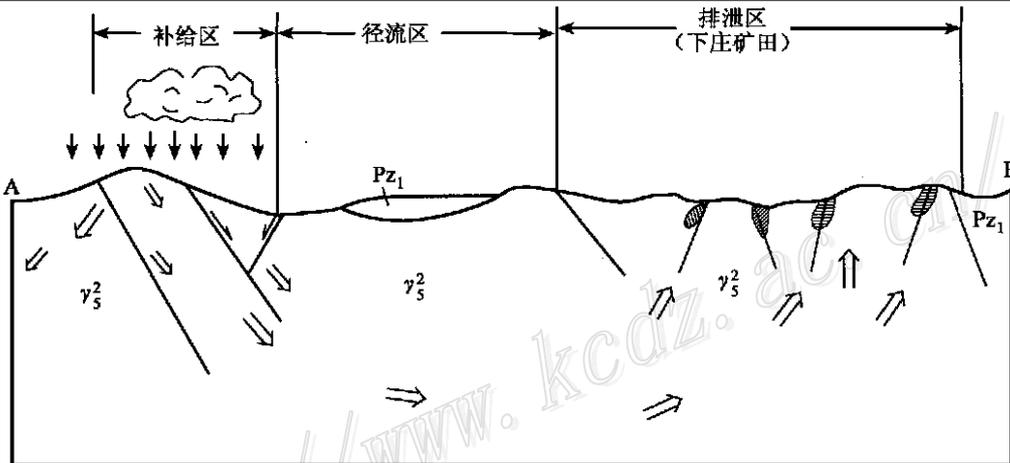
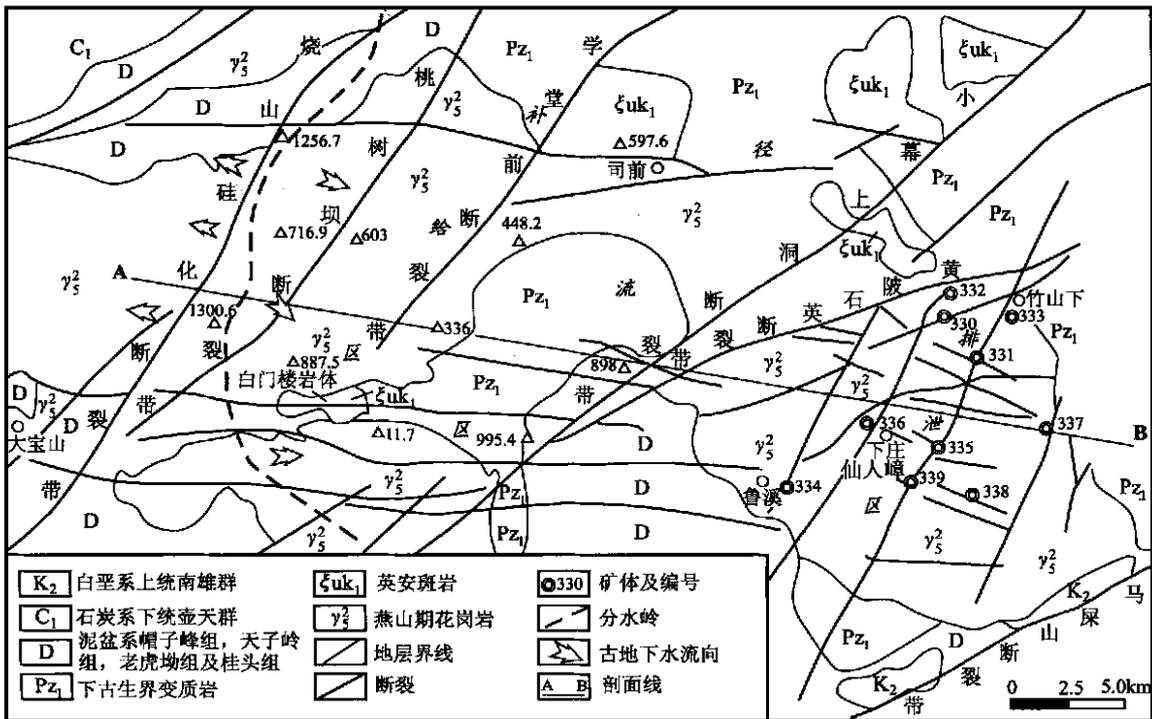


图1 下庄地区区域古水文地质略图

Fig. 1 Regional paleohydrogeological map of the Xiazhuang orefield

中铀含量增高和岩石发生水热蚀变等。这些变化使成分相对简单的大气降水渗入地下后变为成分复杂的成矿热液,并伴有铀的溶滤、迁移、沉淀富集等过程。铀矿床的形成与成矿期热水溶液的水文地球化学特征具有密切的联系。

2.1 热水溶液的气体成分

热水溶液气体成分,通过直接测定矿物流体包裹体气体成分获得。下庄古热水溶液中气体成分以CO₂为主,它是下庄矿田铀成矿的主要矿化剂之一。成矿前,溶液中CO₂的质量分数w(CO₂)约为4.489

μg/g,成矿期为8~70 μg/g,平均29.2 μg/g。除CO₂外,成矿溶液中还有CH₄和H₂,其质量分数分别为0.011~3.922 μg/g和0.117~1.195 μg/g(表1)。

2.2 热水溶液的化学成分

下庄矿田矿物流体包裹体液相成分、类型与E_h、pH值列于表2。成矿期溶液中K⁺、Na⁺、Ca²⁺含量明显增高,浓度ρ_B分别为4.731~46.250 g/L(平均21.8g/L)、4.350~9.980 g/L(平均7.1 g/L)和2.890~38.630 g/L(平均24.0g/L)。阴离子以

表 1 下庄矿田矿物流体包裹体气体成分 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 1 Gas composition of fluid inclusions in the Xiashuang orefield

序号	样号	矿物	$w(\text{H}_2)$	$w(\text{CH}_4)$	$w(\text{CO}_2)$	备注
1	XZ1	石英	未检出	0.032	4.489	成矿前
2	XZ6	石英	0.117	0.193	32.655	成矿期
3	XW014	石英	1.195	3.922	8.008	成矿期
4	XW019	石英	0.836	0.011	70.065	成矿期
5	ZSX010	石英	1.005	2.758	8.085	成矿期
6	ZSX020	石英	0.565	1.075	27.078	成矿期

测试单位:中南工业大学测试分析中心。测试者:万 方。

表 2 下庄铀成矿古水热系统矿物流体包裹体液相成分、水化学类型及 E_h 、pH 值Table 2 Hydrochemical compositions, types and E_h 、pH values of fluid inclusions in the Xiashuang uranium ore-forming fossil hydrothermal system

序号	样号	矿物	质量浓度 $\rho_B / (\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$								E_h / V	pH	水化学类型	
			K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	F^-				总和
1	XZ1	石英	1.603	1.426	7.094	0.146	24.041	3.651	5.090	1.786	44.837	-0.810	8.63	$\text{HCO}_3^- \text{Ca}$
2	XZ6	石英	4.731	9.522	19.559	1.045	77.127	2.446	16.024	0.570	131.024	-0.494	7.05	$\text{HCO}_3^- \text{Ca}\cdot\text{Na}$
3	XW014	石英	36.990	6.700	29.240	0.980	7.200	20.950	27.710	58.130	187.900	-0.453	6.38	$\text{F}\cdot\text{Ca}\cdot\text{K}$
4	XW019	石英	46.250	4.350	2.890	0.450	69.520	11.060	31.360	18.420	184.300	-0.437	6.64	$\text{HCO}_3^- \text{F}\cdot\text{K}$
5	ZSX010	石英	7.440	4.830	38.630	0.890	7.160	7.290	11.010	48.550	125.820	-0.442	6.26	$\text{F}\cdot\text{Ca}$
6	ZSX020	石英	13.540	9.980	29.760	1.190	26.950	11.230	12.340	35.600	140.610	-0.504	7.06	$\text{F}\cdot\text{Ca}$

测试单位:中南工业大学测试分析中心。测试者:何禄卿,谭书香。

HCO_3^- 、 F^- 为主,其含量 ρ_B 分别为 7.160 ~ 77.127 g/L (平均 37.6 g/L) 和 0.570 ~ 58.130 g/L (平均 32.3 g/L)。水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{F}\cdot\text{Ca}$ 型、 $\text{F}\cdot\text{Ca}\cdot\text{K}$ 型和 $\text{HCO}_3^- \text{F}\cdot\text{K}$ 型。矿化度 125.8 ~ 187.9 mg/L。

下庄矿田成矿溶液的成分在成矿前与成矿期具有较大的变化,这与水-岩相互作用有关。该区花岗岩的矿物成分主要为石英、斜长石、钾长石、黑云母、白云母。在成矿期的高温条件下,地下水循环深度大,当水与岩石相互作用时,岩石中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 F^- 进入到溶液中,使溶液中 K^+ 、 Na^+ 、 F^- 含量明显增高,形成矿化度较高的 $\text{HCO}_3^- \text{Ca}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{F}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{F}\cdot\text{Ca}\cdot\text{K}$ 型水。 F 为本区铀成矿的重要矿化剂之一,主要来自围岩的溶滤。

3 古水热系统排泄区地下水铀成矿作用

3.1 热水溶液中铀的存在形式及其演化

3.1.1 铀存在形式

下庄矿田成矿热液中铀的存在形式根据地球化学模式 PHREEQE 程序 (David et al., 1990) 计算获得。计算结果列于表 3。

由表 3 可以清楚地看出,下庄矿田成矿热水溶液中的铀在成矿前以 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ (二碳酸铀酰) 占优势 (占 80.29%), 其次为 UO_2CO_3^0 (一碳酸铀酰, 占 19.71%), 也就是说,热水溶液中的铀主要以二碳酸铀酰形式迁移; 成矿期, 铀以 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 和 UO_2F_3^- 、 $\text{UO}_2\text{F}_4^{2-}$ (氟化铀酰) 形式迁移。可见, 无论是成矿前还是成矿期, 铀都是以六价形式迁移的。其原因一是热液中四价铀极易氧化成六价铀, 而六价铀一般与氧结合形成十分稳定的铀酰络离子 UO_2^{2+} , 并组成络合物的中心离子, 当铀成矿热液中含有 CO_3^{2-} (可由 CO_2 转化而来)、 F^- 等阴离子时, 中心离子则与这些阴离子配合, 组成各种配离子进行迁移; 二是铀在水溶液中虽然可以呈四价和六价两种价态存在, 但四价铀离子及其络离子在水溶液中溶解度很低, 通常可以忽略不计 (章邦桐, 1990)。

3.1.2 铀存在形式的演化

流体包裹体的氢、氧同位素和古水文地质条件研究 (刘金辉, 1995) 表明, 下庄铀成矿古水热系统的水主要来自大气降水 (Liu et al., 1995), 铀来自围岩 (花岗岩)。在补给区, 接受大气降水补给的地下水是一种含氧的和含一定数量 CO_2 (大气起源) 的低矿

化度水,这种水在地表浅部氧化环境下,与风化岩石相互作用,溶滤岩石中的铀和其他化学组分,形成以二碳酸铀酰为主要存在(迁移)形式的含铀溶液。经过铀表生淋滤后的水溶液再沿裂隙渗入到地下深处,即由相对氧化进入到相对还原的地球化学环境中。在这一过程中,水中的 O_2 不断消耗,水温不断升高,当与来自深部的物质,如 CO_2 、 CH_4 、 H_2 等气体相混合时,水对围岩中铀的活化、溶滤进一步加剧,从而形成成矿热液流体,并在水压差和热引擎作用下上升,向减压排泄区运动(李学礼,1992)。随着成矿热液上升,溶液的 E_h 值增高,氧化性增强,以四价铀迁移的配离子又演化变成六价配离子,从而形成以 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 、 $UO_2F_3^-$ 、 $UO_2F_4^{2-}$ 为主要迁移形式的富铀成矿热液。

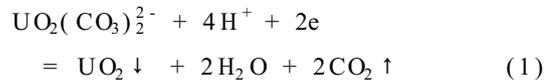
3.2 铀的沉淀机理

成矿热液进入古水热系统的减压排泄区后,由于温度、压力降低,物理-化学平衡遭到破坏,铀便由迁移阶段进入沉淀阶段。在下庄矿田,存在以下3种铀的沉淀机制。

3.2.1 CO_2 脱气作用

地下热水循环过程中,当水中混入 CO_2 气体时,溶液有利于铀的溶滤和迁移,而 CO_2 从水中逸出,则

使铀变得不稳定,易于还原沉淀。下庄矿田二碳酸铀酰配离子的还原沉淀与 CO_2 脱气作用密切相关。 CO_2 脱气作用可使成矿溶液中占优势的二碳酸铀酰产生沉淀,形成沥青铀矿。即:



根据热力学参数并考虑热水溶液中的 CO_2 含量和 pH、 E_h 值,笔者对上述反应中铀的沉淀临界电位 $E_{hC,U}$ 和水-铀比电位值 $\Delta E_{hW,U}$ 进行了计算,计算结果列于表4。由表4可以看出,铀的水-铀比电位值与溶液中的 CO_2 含量、pH 值及水的 E_{hW} 值有关。成矿期,随着 CO_2 脱气作用的加强,溶液中铀的水-铀比电位值均小于零,且显示出 CO_2 含量越低, $\Delta E_{hW,U}$ 越负的规律。也就是说,溶液中的 CO_2 含量愈低,即 CO_2 脱气愈强烈,愈易产生铀的沉淀。这一事实表明 CO_2 脱气作用是下庄矿田最重要的成矿机理之一。在溶液进入排泄区的脱气过程中,虽然其 E_{hW} 有所增高,但其增加的幅度较 $E_{hC,U}$ 值更慢,使 $\Delta E_{hW,U}$ 始终保持负值而导致铀的沉淀 ($\Delta E_{hW,U} = E_{hW} - E_{hC,U}$)。可见,以往人们认为 E_{hW} 值愈低,铀愈易还原沉淀的结论尚具片面性,必须充分考虑铀

表3 下庄矿田热水溶液中铀的存在形式

Table 3 Modes of uranium occurrence in the hydrothermal solution of the Xiazhuang orefield

序号	样号	铀存在形式(%)					E_h/V	成矿阶段
		$UO_2CO_3^0$	$UO_2(CO_3)_2^{2-}$	$UO_2(CO_3)_3^{4-}$	$UO_2F_3^-$	$UO_2F_4^{2-}$		
1	XZ1	19.71	80.29	0.00	0.00	0.00	-0.810	成矿前
2	XZ6	0.35	97.47	2.18	0.00	0.00	-0.494	成矿期
3	XW014	0.00	0.00	0.00	4.81	95.19	-0.453	成矿期
4	XW019	0.00	0.73	0.00	6.02	92.25	-0.437	成矿期
5	ZSX010	0.00	0.00	0.00	81.27	18.73	-0.442	成矿期
6	ZSX020	0.00	0.00	0.00	3.46	96.54	-0.504	成矿期

表4 下庄矿田热水溶液中 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 的 $\Delta E_{hW,U}$ 值

Table 4 $\Delta E_{hW,U}$ values of $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ in the hydrothermal solution of the Xiazhuang orefield

样号	$CO_2/(\mu g \cdot g^{-1})$	pH	计算温度/°C	E_{hW}/V	$E_{hC,U}/V$	$\Delta E_{hW,U}/V$	阶段
XW019	70.065	6.64	200	-0.437	-0.134	-0.303	成矿期
XZ6	32.655	7.05	200	-0.494	-0.180	-0.314	成矿期
ZSX020	27.078	7.06	200	-0.504	-0.174	-0.330	成矿期
ZSX010	8.085	6.26	200	-0.442	0.025	-0.467	成矿期
XW014	8.008	6.38	200	-0.453	0.003	-0.456	成矿期

注:(1)表中 E_{hW} 为成矿热液的氧化还原电位值, $E_{hC,U}$ 为铀氧化还原临界电位值, $\Delta E_{hW,U}$ 为水-铀比电位值。

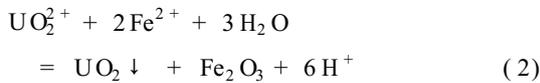
(2) $E_{hC,U} = E_{hT}^0 + RT/(nF) \ln(a_{ox}/a_{red})$ (史维浚,1990),式中: E_{hT}^0 —物质的标准氧化还原电位; a_{ox} —氧化态物质活度; a_{red} —还原态物质活度; R —气体常数; T —绝对温度; F —法拉第常数; n —得失电子数。

的氧化还原临界电位的影响。国内外许多热液铀矿床并未在深部成矿,而是多分布在地壳浅部的事实支持了上述结论。下庄矿田矿体主要分布于地表浅部,其重要原因之一就是由于 CO₂ 大量脱出所致。

3.2.2 中和还原作用

如前所述,下庄矿田成矿热液中铀的主要迁移形式为 UO₂(CO₃)₂²⁻, UO₂F₃⁻ 和 UO₂F₄²⁻。表 5 给出了与铀沉淀有关的化学反应方程式。从表 5 中可以看出,不同温度条件下(150 ~ 300 °C)的反应自由能 ΔG_T⁰ 远小于零(下庄矿田铀成矿温度为 151 ~ 253 °C,平均 200 °C,刘金辉,1995),说明反应完全能够自发进行。根据铀中和还原成矿作用原理(史维浚,1990),铀还原沉淀的主要条件是水-铀比电位值 ΔE_{h,w,U} < 0。表 6 列出的 UO₂F₃⁻ 和 UO₂F₄²⁻ 沉淀的 ΔE_{h,w,U} 均为负值。这充分说明成矿热液进入排泄区将产生大量的 UO₂ 沉淀。

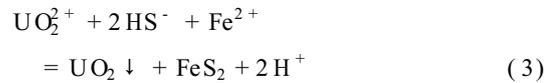
由于下庄矿田矿前期的 m(Fe₂O₃)/m(FeO) 低(0.230),成矿期高(1.271 ~ 2.710)(刘金辉,1995),也就是说,在 Fe²⁺ 转变为 Fe³⁺ 的同时,U⁶⁺ 变为 U⁴⁺,产生铀矿化,因而,Fe²⁺ 也是铀沉淀的主要还原剂之一:



矿田内发育的沥青铀矿与赤铁矿共生是本区的重要矿化特征。

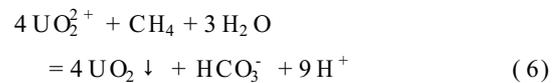
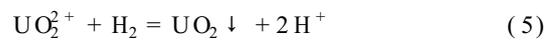
根据硫存在形式计算结果(刘金辉,1995),热水

溶液中硫以 HS⁻ 和 H₂S 占优势,它们可以使铀还原沉淀:



矿田内见到的沥青铀矿和黄铁矿伴生即是式(3)作用的结果。

此外,热水溶液中的某些还原性较强的气体(CH₄, H₂),也可以使铀产生沉淀,其具体反应如下:



3.2.3 吸附作用

由于下庄古水热系统中的某些细小矿物颗粒(如绿泥石、白云母等)比表面积较大,因此,对铀具有较强的吸附性,当含铀热水溶液与这些矿物接触时,热液中的一部分铀被吸附而沉淀。矿田内发育的绿泥石和水云母型铀矿化即与吸附作用有关。

4 结 论

综上所述,通过对下庄矿田矿物流体包裹体气相、液相成分的分析 and 计算,笔者对下庄矿田古水热系统排泄区的铀成矿作用得到以下认识:

表 5 与铀沉淀有关的化学方程式及其 ΔG_T⁰、E_{hT}⁰ 值

Table 5 Chemical equations and their ΔG_T⁰, E_{hT}⁰ values in relation to uranium precipitation

化学方程式	ΔG _T ⁰ / (kJ·mol ⁻¹)				E _{hT} ⁰ / V			
	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C
UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻ + 4H ⁺ + 2e = UO ₂ ↓ + 2H ₂ O + 2CO ₂ ↑	-228.2	-241.7	-225.3	-268.8	1.183	1.252	1.318	1.387
UO ₂ (CO ₃) ₃ ⁴⁻ + 6H ⁺ + 2e = UO ₂ ↓ + 3H ₂ O + 3CO ₂ ↑	-331.1	-361.9	-392.7	-423.6	1.715	1.874	2.033	2.193
UO ₂ F ₃ ⁻ + 2Ca ²⁺ + F ⁻ + 2e = UO ₂ ↓ + 2CaF ₂ ↓	-178.3	-191.1	-204.0	-216.9	0.923	0.990	1.063	1.121
UO ₂ F ₄ ²⁻ + 2Ca ²⁺ + 2e = UO ₂ ↓ + 2CaF ₂ ↓	-117.6	-119.4	-121.3	-123.1	0.614	0.618	0.628	0.638

表 6 下庄矿田热水溶液中 UO₂F₃⁻ 和 UO₂F₄²⁻ 的 ΔE_{h,w,U} 值

Table 6 ΔE_{h,w,U} values of UO₂F₃⁻ and UO₂F₄²⁻ in the hydrothermal solution of the Xiaozhuang orefield

样号	计算温度/ °C	E _{h,w} / V	UO ₂ F ₃ ⁻		UO ₂ F ₄ ²⁻		阶段
			E _{h,c,U} / V	ΔE _{h,w,U} / V	ΔE _{h,c,U} / V	ΔE _{h,w,U} / V	
XW014	200	-0.453	0.412	-0.865	0.100	-0.553	成矿期
XW019	200	-0.437	0.332	-0.769	0.025	-0.462	成矿期
ZSX010	200	-0.442	0.458	-0.900	0.150	-0.592	成矿期
ZSX020	200	-0.504	0.398	-0.902	0.100	-0.604	成矿期

(1) 成矿期古水热系统气体成分主要为 CO_2 , 流体水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 F-Ca 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{F-K}$ 型。

(2) 成矿溶液中铀的存在形式主要为 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 、 UO_2F_3^- 和 $\text{UO}_2\text{F}_4^{2-}$, CO_2 和 F^- 是铀成矿作用的主要矿化剂。

(3) CO_2 脱气作用以及中和还原作用是下庄古水热系统排泄区(减压区)内铀矿床形成的重要成矿机理, 铀沉淀是在铀酰络合物水-铀比电位值 ($\Delta E_{\text{h,w,U}}$) 小于零的条件下产生的。

参考文献

李学礼. 1992. 论热液水源矿(铀)源三源成矿理论问题[J]. 华东地

质学院学报. 15(2): 101~112.

刘金辉. 1995. 古水热系统与铀成矿关系研究——以广东下庄、江西相山铀矿田为例[硕士学位论文][D]. 导师: 李学礼. 江西抚州: 华东地质学院.

史维浚. 1990. 铀水文地球化学[M]. 北京: 原子能出版社. 147~265.

章邦桐. 1990. 内生铀矿床及其研究方法[M]. 北京: 原子能出版社.

David L P, Donald C T, Niel Plummer L. 1990. PHREEQE—A computer program for geochemical calculations[CP]. U. S. Geological Survey.

Liu J H, Li X L, Shi W J, et al. 1995. Origin of water in the Xiazhuang fossil hydrothermal system, China[A]. WRI-8 Proceeding [C]. Netherlands: A. A. Balke ma, Rotterdam. 379~382.

A Study on Uranium Mineralization in the Discharge Area (Depressuring Area) of the Xiazhuang Uranium Ore-forming Fossil Hydrothermal System

Liu Jinhui, Li Xueli

(East China Geological College, Fuzhou 344000)

Key words: fossil hydrothermal system, discharge area, water-uranium specific potential value, CO_2 degasification, uranium deposit

Abstract

The granite type uranium deposit in Xiazhuang, formed in the discharge area of fossil hydrothermal system, is a product of thermal water-rock interaction. Hydrogeochemical analysis of mineral inclusions indicates that gases in the solution are dominated by CO_2 , and hydrothermal solutions are of $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$, F-Ca and $\text{HCO}_3\cdot\text{F-K}$ types in the Xiazhuang uranium ore-forming fossil hydrothermal system. Geochemical model and thermodynamic calculations prove that modes of uranium occurrence in hydrothermal solutions are $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$, UO_2F_3^- and $\text{UO}_2\text{F}_4^{2-}$. In the course of deep circulation of water solution, the precipitation critical potential values of uranium ($E_{\text{hC,U}}$) in the solution evidently decrease when CO_2 enters the solution, so that water uranium specific potentials ($\Delta E_{\text{h,w,U}}$) are usually of positive values ($\Delta E_{\text{h,w,U}} = E_{\text{h,w}} - E_{\text{hC,U}}$). Therefore, uranium could easily migrate under the deep relative reduction condition. When uranium-rich hydrothermal ore solution entered the depressuring discharge area, carbon dioxide would experience degasification, and neutral reducing mineralization would occur due to alteration of physical-chemical conditions in solution, resulting in $\Delta E_{\text{h,w,U}} < 0$. In consequence, uranium would be precipitated and concentrated, and large-size granite type uranium deposit would be formed.