

八卦庙超大型金矿床构造—矿物—地球化学

方维萱^{1, 2} 黄转莹^{1, 3} 刘方杰^{2, 3}

1. (中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室 贵阳 550002)

2. (西北大学地质系 西安 710069)

3. (西北有色金属地质勘查局 西安 710054)

提 要 通过对陕西省凤县八卦庙超大型金矿床储矿构造的矿物地球化学研究认为: 泥盆纪时, 在银母寺—八卦庙—八方山三级构造热水沉积成矿盆地中形成了金矿源层。海西晚期在古地热异常背景下, 金矿源层发生顺层韧性压剪切变形, 印支期脆—韧性挤压剪切变形构造过程中金发生富集成矿, 燕山期脆性变形—深源热流体叠加成矿富化。该金矿床属含金脆—韧性剪切带型金矿床, 多源多期次含矿热流体同位叠加成矿作用说明八卦庙超大型金矿床是寻找非常规超大型金矿床的远景区。

键 词 超大型金矿床 矿物地球化学 显微构造地球化学 秦岭八卦庙

近年来随着构造地质学的进展, 构造地质与矿床学、地球化学之间不断相互渗透, 形成了一些新兴交叉学科, 如成矿构造学、构造地球化学、成矿作用动力学, 这些交叉学科的研究成果使构造与成矿之间的关系更为密切^[1~7]。含金脆—韧性剪切带常发育微构造及显微构造, 它们是矿物尺度上的构造变形。在有流体参与的脆—韧性构造变形过程中, 有显著的物质调整、新生矿物及化学元素的变化, 从构造—矿物—地球化学尺度上进行研究, 可深层次地揭示构造变形过程中物质调整与变化。通过研究构造变形过程中矿物成分的变化规律, 有助于认识成矿成晕过程及元素富集成矿规律, 这也是矿物地球化学研究的一个方向。

1 八卦庙矿床地质特征

凤太泥盆纪盆地位于南秦岭泥盆系中带的中部, 西临甘肃西成盆地, 东临镇安盆地。盆地西侧为白水江古陆, 位于成县—凤县的基底隆起, 分隔了西成盆地与凤太盆地, 东侧为佛坪古陆分隔了镇安盆地与凤太盆地。凤太盆地是总体东西长、南北宽的菱形拉分盆地。该盆地的北部边界同生断层为凤州—靖口关断裂(商丹带西段), 南部边

界同生断层为留坝断裂。凤县—凤镇—山阳(西段)及酒奠梁—镇安—板岩镇(西段)两条巨型同生断裂分别从凤太拉分盆地北部和南部穿过, 是穿盆同生断裂, 这四条同生断裂控制了凤太泥盆纪沉积盆地的形成与演化。在凤太地区中部西河一带近南北向同生断裂及受其控制的发育近南北向水下隆起, 又将其分割成西部凤县二级盆地、东部太白二级盆地。八卦庙超大型金矿床位于凤县二级盆地东北缘上的银母寺—八卦庙—八方山拉分式三级构造热水沉积盆地之中^[8]。

矿区出露地层主要为中泥盆统上岩段(D_{2g2})和上泥盆统星红铺组下岩段, 赋存层位为星红铺组下岩段。赋矿岩石为斑点状粉砂质千枚岩、铁白云质千枚岩、钠长石化铁白云质千枚岩、黑云母钠长岩等。是一套深海—半深海浊流沉积岩, 发育等深流沉积层理、包卷层理、液化构造、水平纹理、化学成分层理, 显示热水浊流沉积的特征。区域构造线方向总体为 NWW—SEE 向, 由一系列轴向为 NWW 向的紧闭褶皱和脆性—韧性断裂构成, 发育 NE 向、NW 向及近 SN 向的张剪性裂隙、节理及断裂。八卦庙金矿床位于 NWW 向苏家沟—空棺沟复向斜西端北翼。矿化体走向与主剪切带走向一致, 呈 NW—SE 走向, 北矿带长 1 680m, 宽 50~60m, 规模最大的矿体已控制长 500m, 延深 220m, 平均厚度为 4.84m, 平均金品位为 5.17g/t。矿体走向 132°, 倾向北东, 倾角 66°~84°, 与地层产状大致相同(图 1)。

ISSN 1000-4734 1999 年 10 月收稿 2000 年 1 月改回

第一作者简介 方维萱 男 1961 年生 高级工程师(博士后)
主要从事矿产勘查、沉积盆地与地质流体研究

* 本文研究由中国有色金属工业总公司人才培养基金及中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室联合资助

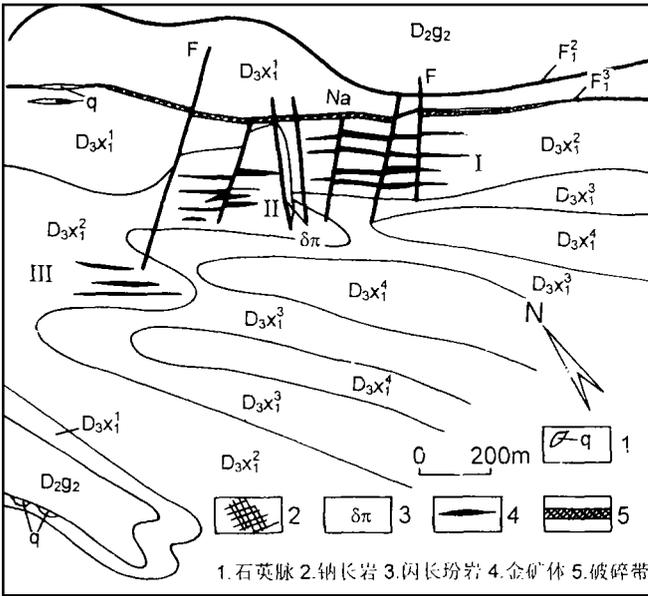


图 1 八卦庙金矿床地质略图
(据西北有色地质勘查局 717 队修编)

Fig. 1. Geological sketch map of the Baguamiao gold deposit.

I. 北矿带 II. 中矿带 III. 南矿带 F. 断层及编号 Na. 钠长石化
D_{2g2}. 中泥盆统古道岭组 D_{3x1¹}. 上泥盆统星红铺组第一岩性层
D_{3x1²}. 上泥盆统星红铺组第二岩性层 D_{3x1³}. 上泥盆统星红铺组第三岩性层
D_{3x1⁴}. 上泥盆统星红铺组第四岩性层

2 矿床的矿物地球化学

2.1 自然元素类

镜下观察到的自然金呈不规则粒状、片状, 粒径为 1~20 μ m, 最大者达 1.2mm, 主要分布于磁黄铁矿、黄铁矿和石英中。单体金的产出形式有^[9]: ①石英晶体中呈细小包裹体; ②石英或绢云母粒(片)间; ③岩石的显微裂隙中; ④磁黄铁矿与石英粒间; ⑤与磁黄铁矿连生。从表 1 看: 自然金的成色为 836‰~931‰, 平均为 878‰, 含量为 6.89‰~15.01‰, 为含银自然金。随着深度增加, 金成色有增高的趋势。

2.2 硫化物类

矿区内主要载金硫化物为黄铁矿、磁黄铁矿。从表 2, 3 看: 与黄铁矿标准值相比, 成岩期石英脉中的黄铁矿是亏铁富硫型; 热液期浸染状黄铁矿、石英脉中的黄铁矿为富铁亏硫型。热液期黄铁矿化中 Au、As、Bi、Pb、Te 等元素含量大于成岩期黄铁矿中这些元素的含量, Cu、Zn 含量则相反。其他元素的变化规律不甚明显^[9]。本区磁黄铁矿的结构式为:

样号	结构式
PD118-1	(Fe _{0.75} Ni _{0.01}) _{0.76} (S _{0.96} Se _{0.04}) _{1.00}
BT3-3	Fe _{0.82} (S _{0.987} Se _{0.007} As _{0.006}) _{1.00}
BT3-2	(Fe _{0.81} Cu _{0.01}) _{0.82} (S _{0.968} Se _{0.015} As _{0.016}) _{1.00}
BT3-4	Fe _{0.77} (S _{0.966} Se _{0.017} As _{0.017}) _{1.00}

表 1 八卦庙金矿床中不同深度自然金成色

Table 1. Fineness of native gold at different depths in the Baguamiao gold deposit

样号	采样位置	采样深度/m	电子探针分析/%					Σ	金成色/‰
			Au	Ag	Cu	Fe	Σ		
Bau2B①	TC62	地表	86.76	12.82	0.28	0.14	100.00	868	
Bau2B②	TC62	地表	87.84	12.03	0.05	0.08	100.00	878	
91-425	ZK8001	-105	85.81	13.96	0.10	0.13	99.99	860	
91-458	ZK8001	-121	86.84	12.30	0.86	<0.01	100.00	876	
91-278①	ZK6201	-245	92.51	6.89	0.43	0.16	99.99	981	
91-278②	ZK6201	-245	92.84	7.01	0.10	0.05	100.00	980	

注: 据韦龙明、曹远贵、王民良等人^[9]

表 2 硫化物的化学成分及微量元素含量

Table 2. Chemical composition and trace element contents of sulfides from the Baguamiao gold deposit

样号	产状	测定矿物	Au	Ag	As	Hg	Sb	Bi	Cu	Pb	Zn	Se	Te	Co	Ni	Fe	S	Σ
90-22	地层	磁黄铁矿	0.71	3	450	<0.05	29	<10	1380	12	220	20.5	2.1	620	1300	64.35	35.75	100.10
90-1	石英脉	黄铁矿	0.16	17	2000	<0.05	<20	45	42	240	190	42.0	2.2	140	270	44.48	54.38	99.34
91-417	ZK6001	浸染状黄铁矿	0.22	20	530	1.27	23	29	12	130	1100	<0.2	0.6	30	31	45.26	51.63	97.10
91-457	ZK6001	石英脉中黄铁矿	134.0	40	2500	0.21	13	120	7.5	280	44	24.0	24.0	120	110	44.82	51.11	93.35
90-79	PD1 石英脉	磁黄铁矿	29.17	5.8	420	<0.05	29	<40	88	65	<1	22.0	16.6	100	340	58.28	37.80	97.24
B Au6	PD1 石英脉	磁黄铁矿	38.46	6.8	720	<0.05	42	<40	86	23	<1	16.0	9.9	300	450	57.86	38.02	96.19

注: 据韦龙明等人^[9], Fe、S、Σ为%, 其余均为 10⁻⁶

表 3 硫化物化学成分的电子探针分析(%)

Table 3. Electron probe analyses of sulfides from the Baguamiao gold deposit (%)

样号	地质产状	测定矿物	S	Fe	Cu	Co	Ni	As	Se	Au	Ag	Σ
PD116-1	黑云母钠长岩	磁黄铁矿	48.80	54.99	0.16	0.16	0.86	0.00	3.69	0.28	0.00	100.94
BT3-3	黑云母千枚岩	磁黄铁矿	39.25	56.77	0.14	0.11	0.24	0.55	0.68	0.00	0.08	97.82
BT3-2	沿交面线理产出	磁黄铁矿	39.49	56.25	0.87	0.15	0.22	1.56	1.49	0.20	0.10	100.43
BT3-4	磁黄铁矿铁白云石脉	磁黄铁矿	40.35	56.25	0.01	0.14	0.17	1.71	1.75	0.03	0.03	100.43

分析单位: 国土资源部西安地质矿产研究所; JEOL-733 型电子探针仪; 分析条件: 加速电压: 25kV; 电流: 20nA; 束斑: 3^μm; ZAF 校正; 总量误差为 ±1%

表 4 硅酸盐矿物的电子探针分析(%)

Table 4. Electron probe analyses of silicate minerals from the Baguamiao gold deposit (%)

样号	产状	测定矿物	NaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	K ₂ O	FeO	BaO	Cr ₂ O ₃	Σ	资料来源
BT-3-1	等深积岩	水云母	0.24	0.58	33.69	42.69	0.09	0.15	7.08	1.00	0.15		86.30	
BT3-21	剪切带中 A 型	绢云母	0.14	1.20	32.94	52.00	0.05	0.08	7.76	2.09	0.05	0.12	96.42	
BT3-27	褶皱, 石英	绢云母	0.19	1.05	35.02	51.82	0.00	0.22	7.96	2.18	0.10	0.09	95.59	
BT3-28	绢云母岩	绢云母	0.12	1.33	32.71	50.38	0.00	0.19	8.17	2.62	0.15	0.06	96.75	本
BT3-25		绢云母	0.06	1.18	32.80	51.48	0.00	0.25	8.08	1.91	0.00	0.53	96.33	
BGNa2	钠—中长石	黑云母	0.02	11.41	17.89	38.38	0.10	1.27	8.68	17.92	0.11		96.14	
BGNa3	黑云母岩	黑云母	0.03	11.56	18.02	36.77	0.22	1.42	9.15	17.89	0.21		95.78	
PD118-11	黑云母	铁云母	0.04	11.11	24.11	25.69	0.45	0.08	5.76	28.11	0.08		96.80	
PD118-15	钠长岩	黑云母(斑点)	0.37	1.74	33.96	47.11	0.03	0.42	8.86	2.03	0.12		94.65	
BGNa1	钠—中长石	钠长石	7.95	0.07	21.02	68.63	3.52	0.00	0.06	0.00	0.02	0.00	101.48	
BGNa4	黑云母岩	中长石	4.83	0.12	24.98	60.29	7.31	0.01	0.14	0.56	0.03		98.27	
PD118-13	黑云母	钠长石	8.25	0.16	21.50	67.33	0.86	0.00	0.07	0.09	0.05		98.67	
PD118-19	钠长岩	钠长石	11.01	0.05	20.19	66.07	1.33	0.01	0.06	0.13	0.01		99.61	文
PD118-17	黑云母	铁绿泥石	0.07	12.00	22.01	23.11	0.00	0.06	0.00	31.72	0.01		89.87	
PD118-16	钠长岩	绿泥石	0.08	13.30	28.09	24.03	0.14	0.09	0.00	28.12	0.06		88.93	
TC62	钠长细晶岩脉	钠长石	10.66	0.12	19.20	68.44	0.11	0.08	0.17				99.12	
TC62	钠长细晶岩脉	钠长石	10.56	0.07	19.45	68.24	0.17	0.14	0.08				98.87	韦龙明
PD1	热液蚀变岩	钠长石	10.54	0.07	19.29	68.61	0.38	0.02	0.22				99.30	等 ^[9]
PD1	热液蚀变岩	钠长石	10.22	0.08	19.23	68.36	0.54	0.18	0.18				98.76	

测试单位: 国土资源部西安地质矿产研究所; 测定者: 刘文峰; 测试条件: 电压 15kV, 电流 20nA, 束斑 30^μm, ZAF 校正; 空格为未分析项目; 总量误差为 ±1%

2.3 硅酸盐矿物

从表 4 看: 等深积岩中泥砂质成分层已重结晶为石英、绢云母、水云母。镜下可见到水云母具有缎带结构, 显示发生了韧性变形。与产于剪切带中的 A 型褶皱中绢云母相比, Al₂O₃ 高, 而 SiO₂ 低, 含微量的 Na₂O、MgO、Al₂O₃、SiO₂、TiO₂、FeO、BaO 等。产于剪切带的 A 型褶皱中绢云母, SiO₂ 含量在 50.38%~52.00%, Al₂O₃ 为 32.71%~35.02%, 含较高的 FeO、MgO, 微量 Na₂O、TiO₂、BaO、Cr₂O₃。黑云母钠长石、钠—中长石黑云母岩是泥盆纪形成的钠(钾)质热水同生沉积岩, 黑云母—石英—长石—铁白云石等分别组成化学成分层理, 可见到黑云母与长石微晶形成的交织结构, 普遍含黄铁矿。与其相比, 黑云母(斑点)中富 Al₂O₃、SiO₂, 低 MgO、FeO。长石类中含

CaO、Na₂O 高, K₂O 低, 以钠长石—中长石系列为主。绿泥石以镁铁绿泥石为主, Fe/(Fe+Mg)值在 0.542~0.580, 绿泥石以 FeO、MgO、Al₂O₃、SiO₂ 为主, 含其他化学成分甚微。

2.4 碳酸盐矿物

从表 5 看: 主要为含铁白云石, 含 SrO 较高, 其他元素含量甚微。含铁白云石自形程度较好, 显示自热流体中直接结晶而形成, 其化学组成差异不大。矿物显微组构具有显著不同的特点。早期伸展变形过程中形成的含铁白云石(PD118-14)结晶粒度较小, 多在 2mm 以下, 呈浸染状宏观成层状、层纹状顺剪切面理产出。中期挤压剪切变形过程中, 含铁白云石多位于 A 型褶皱的鞍部, 结晶粒度在 10 mm 以上, 解理面发育扭曲和滑动, 显示了韧性剪切变形特征。晚期脆性变形

过程中多以磁黄铁矿铁白云石脉形式产于 NE 向张性裂隙中, 晶体结晶粗大, 多在 $0.2\text{cm} \times 0.3\text{cm}$ 以上, 最大者可达 $1\text{cm} \times 2\text{cm}$ 。磁黄铁矿呈浸染状产于含铁白云石晶体中, 晶体无应力变形现象。NE 向富金石英脉旁的围岩褪色化主要为含铁白云石化及磁黄铁矿所引起, 与没有褪色化的围岩

相比^[10], 富 Fe_2O_3 、 FeO 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 CO_2 (烧失量), 而贫 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 等, 显示富 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、碳酸盐型^[11] (含矿) 热流体在近 NE 向富金石英脉两侧围岩中发生扩散交代作用, 使围岩中元素发生了迁移, 并伴随着金成矿作用发生。

表 5 碳酸盐矿物的电子探针分析(%)

Table 5. Electron probe analyses of carbonate minerals from the Baguamiao gold deposit (%)

样品	产状	测定矿物	CaO	FeO	MgO	SrO	Σ
BT3-24	剪切带中 A 型褶皱	铁白云石	31.42	14.56	12.84	0.68	59.79
BT3-20	磁黄铁矿铁白云石脉	铁白云石	30.71	13.85	12.64	0.47	58.48
PD118-14	黑云母钠长岩	铁白云石	29.61	12.10	14.06		56.40

注: 测试单位: 国土资源部西安地质矿产研究所; 测定者: 刘文峰; 测度条件: 电压 15kV, 电流 20nA, 束斑 $30\mu\text{m}$, ZAF 校正; 空格为未分析项目; 总量误差为 $\pm 1\%$

3 储矿构造的矿物地球化学

3.1 元素赋存形式与找矿指示元素

矿石的组分单一, 工业利用组分有 Au。Au、Ag、Ni、Co、Cu、Pb、Bi 的含量高于围岩, 能够在金矿体上方形成低缓异常, 近矿围岩中有 Au、Cu、Pb、Zn 异常, 但异常强度很小。从金的赋存形式看, 主要为含银自然金, 碲铋矿、自然铋多与自然金共生, 赋存于磁黄铁矿中, 特征找矿指示元素组合为 Au—Ag—Bi—Te, 由于电气石、钠长石、黑云母、绢云母等矿物含量较高, 局部以蚀变的形式存在, B、Na、K 可作为圈定矿床分布范围 (或圈定成矿远景区) 的间接指示元素, Au—Ag—Bi—Te—B—Na—K 组合化探异常是有效的近矿指示元素组合。

3.2 晚泥盆世热水同生沉积预富集作用及准同生变形

3.2.1 晚泥盆世热水同生沉积预富集作用

八卦庙金矿的赋存层位为上泥盆统星红铺组下岩段, 岩性为黑云母钠长岩、钠—中长石黑云母岩、粉砂质千枚岩、铁白云质粉砂质千枚岩。岩层发育等深流沉积层理、包卷层理、化学成分层理、粒序层理, 具热水浊流沉积特征, 形成了金的矿源层。Au 含量为^[12]: $10 \times 10^{-9} \sim 20 \times 10^{-9}$, 可能是有被泥质吸附相金或超显微相金, 标型矿物组合为黑云母—铁云母—钠长石—中长石, 标型元素组合为 Au—K—Na。在银母寺—八卦庙—八方山三级热水沉积盆地中, 金是在高碱(K、Na)岩

石中发生预富集。

3.2.2 海西期韧性顺层剪切伸展变形构造

星红铺组在八卦庙矿床内发育层间流劈理和层间流褶曲, 流劈理产状与层理产状基本一致。流褶曲的走向 $135^\circ \pm$, 倾角 $50^\circ \sim 70^\circ$, 枢纽走向 $120^\circ \sim 130^\circ$, 倾伏角 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。由于剪切作用, 形成一些无根(layer)的层间褶曲石英脉, 这种褶曲在区域上表现为 NW 向的叠加褶皱, 是本区海西晚期左旋剪切运动的产物^[8], 显示了较强的变形作用。这种层间的石英脉中平均含 Au 1.58g/t ($n=17$), 含 Bi 为 0.72×10^{-4} ^[13], 其标型矿物组合为石英—黄铁矿—磁黄铁矿。

3.3 脆—韧性储矿构造

3.3.1 印支期脆性—韧性挤压剪切变形构造

在流变褶曲 (常为流变背斜构造) 核部发育均匀的硅化、铁白云石化及黄 (磁) 铁矿化, 标型矿物组合为自然金—铁白云石—石英—绢云母, 一般金富矿段发育韧性剪切流变背形构造中。采取其核部发育的 A 型褶皱 (属流变背形构造的次级微变形构造) 进行显微尺度的构造—矿物地球化学研究, 镜下观察, A 型褶皱由不同成分的石英层和绢云母层组成。石英有波状消光, 绢云母褶皱纹线十分发育, 缎带结构明显, 沿褶皱纹线有波形分布的黄铁矿、磁黄铁矿微粒。绢云母被折劈所切割, 并有面理置换, 沿新生置换面理分布着磁黄铁矿微粒, 它们的粒径多在 $0.05 \sim 0.07\text{mm}$ 。在显微尺度上亦发生了明显的构造—矿物地球化学分异作用, 从下到上为 (表 2~4):

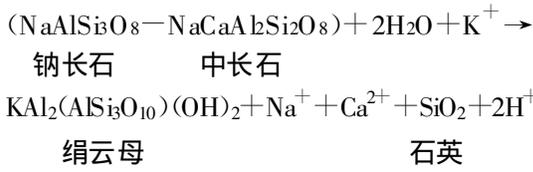
构造—矿物地球化学分异作用的成分层

- ① 缎带状绢云母层+磁黄铁矿(0.5%)
- ② 波状消光的石英及动态重晶石英+铁白云石(0.5%)
- ③ 褶皱纹理状绢云母+磁黄铁矿(0.2%)
- ④ 石英层,特征同②
- ⑤ 褶皱纹理绢云母+磁黄铁矿(0.5%)+折劈状绢云母
- ⑥ 铁白云石+重结晶石英+磁黄铁矿

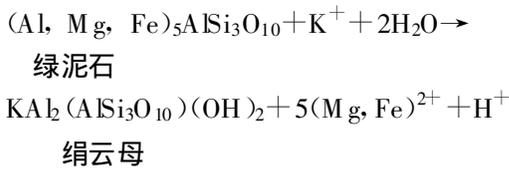
电子探针分析样号及测定矿物

- BT3-21(绢云母)
- BT3-27(绢云母)
- BT3-23(绢云母)、BT3-25(绢云母)
- BT3-24(铁白云石)、BT3-3(磁黄铁矿)

这是脆—韧性剪切构造在显微尺上的矿物—地球化学分异现象。区内的钠长石—中长石可经绢云母化后,产生 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 SiO_2 , 并使岩石发生水化[$(\text{OH})^-$]。化学反应如下:



而黑云母、铁云母发生绿泥石化,绿泥石也进一步发生绢云母化:



在构造动力的驱动下,富 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 SiO_2 的碳酸盐型热流体向 A 型褶皱的顶端运移,形成铁白云石、磁黄铁矿、石英,使金发生富集。这种铁白云石—石英—磁黄铁矿脉在韧性流变背形核部可直接观察到,厚 10~15cm,含铁白云石(50%~70%),磁黄铁矿(20%~15%),构成了富矿脉。绢云母的化学组成表明,在构造动力作用下, MgO 、 TiO_2 、 K_2O 、 Cr_2O_3 向 A 型褶曲顶部运移,而 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe 在其下部的绢云母中富集,使元素发生了构造地球化学分异作用。由于黄铁矿、磁黄铁矿具脆性强的特点,而韧性的绢云母、石英、铁白云石发生韧性变形,显示具有脆—韧性过渡带的特点。

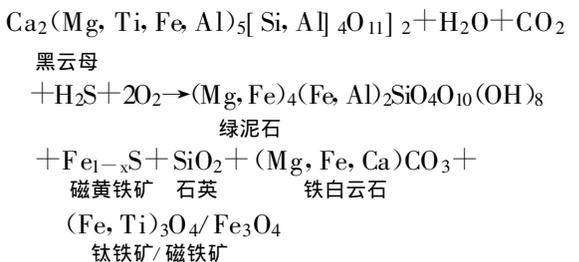
3.3.2 燕山期脆性剪切变形构造

晚期近南北向的挤压作用,使八卦庙—八方山 NW—NW 向脆—韧性剪切带产生了 NE 向的脆性变形叠加,常表现为 NE 向张剪性节理及断裂活动,充填于 NE 向节理中的石英脉平均含金 11.87g/t ($n=20$),含 Bi 为 16.06×10^{-6} [13], Bi 异常由微量的碲铋矿—自然铋所引起, Bi 异常可能暗示八卦庙金矿床与岩浆活动有内在联系。晚期(燕山期)脆性剪切带中,NE 向裂隙、节理及

小断层主要为张剪切性质,它们以小型构造和显微构造的形式独立出现,密度在 3 条/m 以下,常是一些不具工业意义的金富集。当它们出现的密度在 3~5 条/m 时,常是金矿化体,而这种聚矿小型构造及显微构造出现密度在 5 条/m 以上,并叠加于早期韧性剪切伸展变形和中期脆—韧性挤压剪切变形构造之上时,常形成金的富矿段。

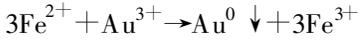
3.4 脆—韧性构造变形过程的矿物地球化学作用

脆—韧性构造变形过程中必然伴随着矿物调正及地球化学作用,从而使矿物达到新的平衡,以适应构造地球化学环境。八卦庙金矿床中,经过构造变形后形成金矿石主要特点之一是强烈的褪色化,郭健等人 [13] 对于褪色化(含金蚀变岩型金矿石)和未褪色化学岩石进行了岩石化学分析,褪色化后的岩石, Au 发生了工业富集, Fe_2O_3 、 CO_2 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 、S、TC 含量升高; MgO 、 H_2O 含量降低。十分特殊的是褪色化前后, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 总量变化很小,只有 1.2% 的变化率,而 Fe_2O_3 增高了 85.26%, FeO 降低了 73.50%, 铁的价态发生了很大的调整,未褪色化岩石在 $(\text{FeO} + \text{MnO}) - (\text{MgO} + \text{CaO}) - \text{Fe}_2\text{O}_3$ 三角图中 [13] 相对集中,呈无序状态;而金矿石(褪色化蚀变岩)之间的连点明显呈有序化状态,这是一种较为典型的自组织系统现象。而褪色化的矿物形式为绢云母、灰绿色绿泥石,而总体上呈灰白色。由于含矿源层发生韧性剪切变形,构造流体上与黑云母发生反应,形成适应新构造环境的绿泥石:



在经过绿泥石化黑云母的边部,常有钛铁矿、

磁铁矿的析出。由于黑云母发生绿泥石后而形成钛铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿及铁白云石,这些矿物造成金矿石中 Fe_2O_3 升高, FeO 降低,是形成这种自组织系统现象的构造地球化学动力学过程,同时也使 Au 成矿元素发生活化,形成富 Au 的含矿构造流体。而在 Fe^{2+} 离子转化为 Fe^{3+} 离子时,使 Au^{3+} 发生还原,进入磁黄铁矿中发生富集成矿:



褪色过程中,由于钠长石—中长石发生大量绢云母化,使金卸载活化,但也形成了大量的 Na^+ , Na^+ 对中长石进行交代而发生钠长石化,或在矿区以钠长石脉、钠长细晶岩脉顺剪切带分布,也可以细脉、脉岩的形式充填在 NE 向小型断层或节理中,而 Ca^{2+} 与 CO_3^{2-} 结合形成了方解石脉。

3.5 成矿流体活动的矿物地球化学示踪

近年来通过对地热体系、热液体系和成岩环境流体反应中形成的绿泥石研究,前人已总结出了根据绿泥石的成分、结构的变化特征来估算其形成的物理化学条件,从而对成岩成矿的环境进行深入分析和探讨^[14-18]。绿泥石是八卦庙金矿床主成矿期热液蚀变的产物,郑作平等^[17]根据 Walsh 的绿泥石组分热力学模型计算了本区绿泥石形成的物理化学条件,形成温度为 $247.6 \sim 335.1^\circ\text{C}$, $\lg f_{\text{O}_2}$ 值为 $27.35 \sim 37.99$, $\lg f_{\text{S}_2}$ 的比值为 $-7.46 \sim -13.02$,与根据成矿期石英包裹体所计算的相近。本文应用 Kranidiotis 和 Mclean^[18]

建立的绿泥石形成温度与其中 Al 、 Fe 、 Mg 四面体配位数的关系方程进行了计算,公式如下:

$$t/^\circ\text{C} = 106 \times \text{Al}^{\text{V}} + 18, \quad \text{其中 } \text{Al}^{\text{V}} = \text{Al}^{\text{IV}} + 0.7 \times \text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$$

本区绿泥石形成温度为 $278.6 \sim 399.9^\circ\text{C}$,与郑作平等^[17]人所获的绿泥石形成温度高出 $6.5 \sim 55.9^\circ\text{C}$,可能是采用不同计算方法所致。可以看出绿泥石化的物化条件具有中温、高硫逸度、低氧逸度的特征。不同产状绿泥石形成条件差异可能反映了成矿流体的时空演化特点,在不同时间、不同岩性、不同构造部位形成不同产状的绿泥石^[17]。

4 讨 论

矿物地球化学研究在矿床的成因、地质勘查中应用、成矿成晕模式、地质地球化学预测系统、区域地球化学场研究等方面有特殊的作用^[19-23]。应用矿物地球化学研究揭示构造变形过程中物质调整与变化,通过研究构造变形过程中矿物成分的变化规律,认识成矿成晕过程及元素富集成矿规律,仅是笔者的一种尝试。通过矿物地球化学研究证明该金矿床属含金脆—韧性剪切带型金矿床,在脆—韧性剪切带中,多源多期次含矿热流体同位叠加成矿作用形成超大型金矿床。八卦庙超大型金矿床已探明金储量达百余吨,是大陆热点成矿系统中长期活动的多源复合型大陆热点成矿^[24]。其深部及外围的找矿潜力仍十分巨大,是寻找非常规超大型矿床^[25]的远景区。

参 考 文 献

- 1 杨国清, 编著. 构造地球化学. 桂林: 广西师范大学出版社, 1990. 1~30
- 2 杨巍然, 张文淮. 构造流体——一个新的研究领域. 地学前缘, 1994, 3(3~4): 124~130
- 3 孙 岩, 戴春森. 论构造地球化学研究. 地球科学进展, 1993, 8(3): 1~6
- 4 张湘炳. 论构造成矿规律及其动力学机制. 大地构造与成矿学, 1992, 16(2): 113~122
- 5 陈国达. 成矿构造研究法. 北京: 地质出版社(第二版), 1985. 1~66
- 6 彭少海. 粤北新洲推覆构造同推覆期构造地球化学的动态学研究. 大地构造与成矿学, 1993, 17(1): 71~81
- 7 陈国达. 历史—因果论大地构造学议. 大地构造与成矿学, 1992, 16(1): 1~71
- 8 方维萱. 秦岭造山带泥盆纪构造热水沉积成矿盆地与流体成岩成矿特征及其演化规律(博士学位论文). 西北大学地质系, 1999. 3~721
- 9 韦龙明, 曹远贵, 王民良. 八卦庙金矿床地质特征及其成因分析. 见: 刘东升, 主编, 中国卡林型(微细浸染型)金矿床. 南京: 南京大学出版社, 1998. 286~305
- 10 刘方杰, 郭 键, 孙 勇, 张复新. 关于八卦庙超大型金矿床成矿建造分析. 西北地质科学, 1999, 20(2): 49~58
- 11 方维萱. 秦岭造山带古热水场的地球化学类型及流体动力学模型探讨—热水沉积成矿盆地分析与研究方法之二. 西北地质科学, 1999, 20(2): 17~27
- 12 王 相, 唐荣杨, 李 实, 李永祥, 等编著. 秦岭造山与金属成矿. 北京: 冶金工业出版社, 1996. 187~229

- 13 郭健, 苏瑞霞, 张恩. 陕西凤县八卦庙金矿床控矿条件分析及找矿方向. 西北金属矿产地质, 1992, (2): 44
- 14 Walshe J L. A six-component chlorite solution model and the conditions of chlorite formation in hydrothermal and geothermal systems. *Econ. Geol.*, 1986, 81: 681-708
- 15 Walshe J L and Solomn M. An investigation into the environment of formation of the volcanic-hosted Mt. Lyell copper deposits using geology, mineralogy, stable isotopes and a six-component chlorite solid solution model. *Econ. Geol.*, 1981, 76: 246-284
- 16 肖志峰, 欧阳自远, 卢焕章. 海底抱板金矿田围岩蚀变带中绿泥石的特征及其意义. 矿物学报, 1993, 13(4): 319~324
- 17 郑作平, 陈繁荣, 于学元. 八卦庙金矿的绿泥石特征及成岩成矿意义. 矿物学报, 1993, 17(1): 100~106
- 18 Kranidiotis P and Maclean W H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Podgemassive sulfide deposits, Matagani, Quebec. *Econ. Geol.*, 1987, 87: 1898~1911
- 19 炎金才. 秦岭泥盆系热水沉积岩中主要矿物的标型特征. 矿物学报, 1995, 15(3): 317~323
- 20 徐国风, 邵洁莲, 丰淑庄, 左大华. 陕西“卡林型”金矿床砷黝铜矿研究. 矿物学报, 1983, (3): 175~182
- 21 方维萱. 小秦岭含金石英脉的矿物地球化学研究. 地质与勘探, 1993, 32(3): 40~50
- 22 方维萱. 陕西凤县铅硐山大型铅锌矿床矿物地球化学研究. 矿物学报, 1999, 19(2): 198~205
- 23 方维萱. 柞水银洞子特大型银多金属矿床矿物地球化学研究. 矿物学报, 1999, 19(3): 349~357
- 24 方维萱, 卢纪英, 张国伟. 南秦岭及邻区大陆动力成矿系统及成矿系列特征与找矿方向. 西北地质科学, 1999, 20(2): 1~16
- 25 涂光炽. 试论非常规超大型矿床物质组成、地质背景、形成机制的某些独特性——初谈非常规超大型矿床. 中国科学(D辑, 增刊), 1998, 28: 1~6

RESEARCH ON TECTONICS-MINERAL-GEOCHEMISTRY OF SUPERLARGE BAGUAMIAO GOLD DEPOSIT, FENGXIAN COUNTY, SHAANXI

Fang Weixuan^{1,2} Huang Zhuanyin^{1,3} Liu Fangjie^{2,3}

1. (LOGD Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

2. (Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069)

3. (Northwest Geological Exploration Bureau, CNNC, Xi'an 710054)

Abstract: Research on the mineral geochemistry of the superlarge Baguamiao gold deposit, Fengxian County, Shaanxi Province, shows that gold source beds, where gold exists in biotite, iron mica and albite-anorthite series, were formed in the Late Devonian. Extensional deformation of the gold source beds with strike-layer ductile shear were induced by the extensive Hercynian geothermal event (D₃-C₁). Biotite tensile lineation, biotite shear foliation and rheomorphic fold characterized the strike-layer ductile shear in the Baguamiao area. A brittle-ductile shear zone was developed in the Baguamiao area during the Indo-Chinese Epoch. Squeeze folds with cleavage of axial plane and shear folds with shear foliation in the Au-bearing brittle-ductile shear zone are characteristic of the Au-bearing tectonic deformational belt. Gold in the source beds was expelled from these Au-bearing minerals by chloritization and sericitization. Under geochemical dynamics of the brittle-ductile shear zone, gold deposition in pyrrhotite by reduction of Au³⁺ to Au⁰ was caused by Fe²⁺ → Fe³⁺. So the gold-bearing brittle-ductile shear zone was formed at the same time. Gold in the deposits was upgraded by hydrothermal superimposing on gold mineralization derived from magmatic fluids at depth along the NE-trending fractures and joints during the Yanshanian epoch. Studies on tectonic deformation and mineral geochemistry of the Baguamiao gold deposit revealed that it is a gold deposit resulting from multi-period and multi-stage gold mineralization in a brittle-ductile shear zone.

Key words: Baguamiao; superlarge gold deposit; mineral geochemistry; microstructure; Qinling