安徽铜陵鸡冠石银(金)矿床地质地球化学特征

储国正[1,2)]　吴言昌[2)]　刘光华[2)]　史东方[2)]
郭祥焱[2)]　周道玉[2)]　胡富娥[2)]

1) (中国地质大学,北京,100083)
2) (安徽省地矿局,合肥,230001)

摘　要　鸡冠石银(金)矿床是铜陵地区一个具中型规模的银(金)矿床,在整个长江中、下游地区都有其代表性。矿床分四个主要成矿阶段:夕卡岩阶段、氧化物 - 硫化物阶段、石英 - 硫化物阶段和石英多金属硫化物 - 碳酸盐阶段。对矿床的微量元素分析结果表明,独立的银、金矿物和含 Au、Ag 低的硫化物、含 Ag 硫盐矿物,主要形成于热液成矿期中晚阶段;矿床的轻、重稀土元素总浓度比值与辉石二长闪长岩相近,反映出二者的同源特征;稳定同位素和流体包裹体成分分析结果,反映出该矿床以岩浆热液为主的成因标志;成矿热液以岩浆水为主,但在成矿晚期有大气降水和地层成分加入;成矿流体为 NaCl - KCl - H_2O 体系;矿床成因属夕卡岩 - 中低温热液充填 - 交代型矿床。

关键词　鸡冠石银(金)矿床　微量元素　稳定同位素　流体包裹体

第一作者简介　储国正　男　1957 年出生　硕士　教授级高工　主要从事矿床和构造研究工作

鸡冠石银(金)矿床位于长江中下游铁、铜、硫、金成矿带铜陵成矿区狮子山矿田的东南部;构造上属于大别造山带前陆盆地的铜陵隆起区。它是铜陵地区首次发现的独立银矿床,具有浅而富、共生组分多的特点,在铜陵地区乃至长江中、下游地区均具有代表性。

1　矿区地质概况

鸡冠石银(金)矿矿区出露地层为中三叠统东马鞍山组厚层含石膏假晶白云岩、白云岩和白云质石灰岩夹石灰岩,经受因岩体侵入而引起的热变质作用后则转变为白云质大理岩和大理岩,是主要赋矿围岩。区域褶皱构造为北东向青山背斜和朱村向斜,鸡冠石矿床恰好处在二者的翼部相互衔接部位。断裂构造主要有近 NE 向和近 EW 向两组,层间滑脱构造亦较发育。侵入岩为一小型蘑菇状闪长岩岩体,出露面积约 1.1km^2,东部超覆于大理岩之上。该岩体超覆于围岩之上所形成的隐伏接触构造带及其附近围岩中的层间滑脱构造,组成了侵入接触 - 层间滑脱及侵入体的裂隙构造系统,构成了矿区的主要控矿构造。该岩体的主要岩石为辉石二长闪长岩和石英二长闪长岩,岩石的 Ar - Ar 法同位素坪年龄为 136.6 ± 1.1Ma,其形成时代为晚侏罗世末—早白垩世初,岩石具良好的含矿性,特别是辉石二长闪长岩,其 Au、Ag 含量分别达 24 ×10^{-9}和 420 ×10^{-9},与成矿的关系密切。

2000 年 2 月 21 日收稿,3 月 31 日改回。

2　矿床地质特征

2.1　矿体的形态和产状

矿体产状按矿体产出情况、形态和矿石特征,可分为三种类型:①脉状硫化物矿体,产于超覆于大理岩之上的石英二长闪长岩体中,受近 EW 向断裂破碎带控制,向南陡倾,长 > 100m,厚 3～5m,向下呈楔形延伸超过 100m,沿走向和倾斜方向有膨缩变化;②似脉状或不规则状夕卡岩型矿床,产于隐伏接触带,走向 NE,倾斜方向随接触面的变化而定,已控制的长度约 260m,厚约 10m,垂深 100m 左右;③透镜状、似层状硫化物型和夕卡岩型矿床,产于隐伏接触带外侧大理岩中,受层间破碎带或虚脱带控制,具多层次特点,走向与接触带矿体基本一致,倾斜方向则随层间破碎或虚脱带的产状而变化,矿体厚度沿走向和倾斜方向有较大变化(图 1)。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

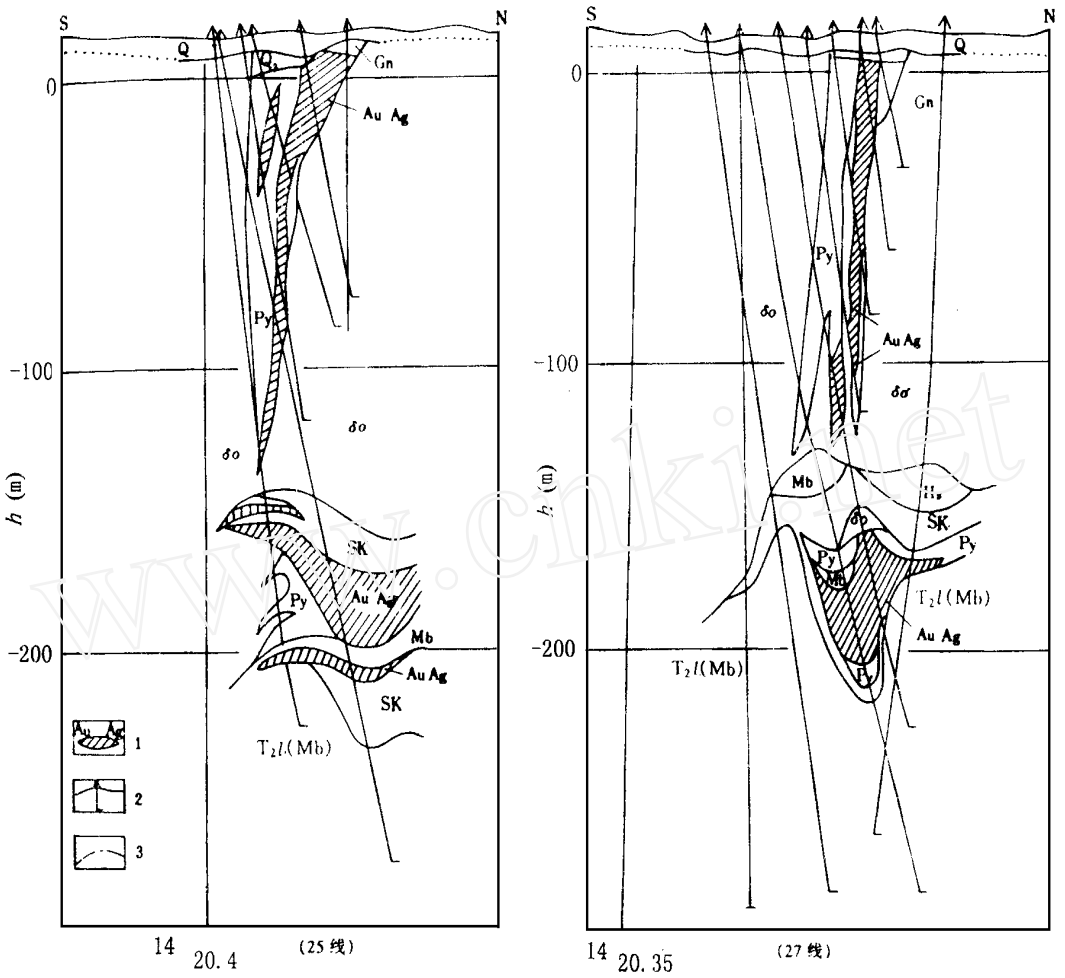

图 1 鸡冠石银(金)矿床 25、27 线地质剖面略图(据 321 地质队,1990)

Fig. 1. Geological sections of Nos. 25 and 27 prospecting lines of the Jiguanshi deposit.

图例说明:1. 金、银多金属矿床;2. 钻孔;3. 推测、实测地质界线。Gn —铁帽;Q —第四系浮土;δo —石英闪长岩; Mb —大理岩;T —中三叠统龙头山组(相当于东马鞍山组);SK —贯入 - 交代夕卡岩;P —黄铁矿体;H —角岩。

2.2 矿石类型及品位

原生矿石,按主要矿物共生组合特点,可分为硫化物型、蚀变石英二长闪长岩型、菱铁矿 - 硫化物型、石英 - 硫化物型、夕卡岩型和磁铁矿型等,其中以硫化物型(包括菱铁矿 - 硫化物型和石英 - 硫化物型)占绝对优势。主要矿石的品位列于表 1。

表 1 鸡冠石银(金)矿床矿石品位

Table 1. Grade of ores in the Jiguanshi silver(gold) deposit

矿体	矿石类型		Au/($\times10^{-6}$)		Ag($\times10^{-6}$)		Cu(%)		Pb(%)		Zn(%)		S(%)	
			平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差
浅部	硫化物型	Au、Ag 多金属	3.42	3.0400	787.56	970.83	0.72	0.5048	6.76	11.6006	8.98	10.2996	23.22	10.4956
		(Au)、Ag 多金属	1.03	0.2961	613.62	231.47	0.58	0.1986	11.08	4.78087	7.70	8.9654	35.70	7.1287
		Ag、菱铁矿	0.65	0.2645	101.25	62.02	0.19	0.1936	-	-	-	-	22.50	6.5971
		(Au、Ag)	0.35	0.2033	17.93	8.9518	-	-	-	-	-	-	32.81	10.5456
	蚀变闪长岩型		0.48	0.5298	336.77	338.67	0.30	0.2691	15.6	14.7423	0.295	0.2636	12.72	10.4772
深部	硫化物型	(Au、Ag)	1.21	0.3789	38.56	13.5965	-	-	-	-	-	-	34.06	11.0275
		石英 - Au、Ag	5.78	8.5290	253.43	258.196	0.88	0.9480	1.55	1.2407	1.06	1.5265	22.26	9.2759
		Au、Ag 多金属	3.3	0.7331	145.31	78.49	0.89	1.7039	1.46	0.3535	1.62	1.0968	37.47	7.2854
		石英 - 硫化物型	0.55	0.5554	36.60	28.615	-	-	-	-	-	-	24.33	7.4345
	夕卡岩 - 硫化物型		0.58	0.7596	26.65	25.036	2.70	1.2270	0.19	0.0617	0.08	0.0575	24.23	7.7856

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　鸡冠石银(金)矿床矿石矿物成分表

Table 2. Compositions of ore minerals in the Jiguanshi silver (gold) deposit

原生带						氧化带		
矿石矿物			脉石矿物			矿石矿物		脉石矿物
主要	次要	微量	主要	次要	微量	主要	次要	
黄铁矿	车轮矿	斜方辉铅铋矿	石英	石榴子石	绿帘石	褐铁矿	白铅矿	石英
锌锑黝铜矿	菱铁矿	辉铅铋矿	长石	透辉石	磷灰石	水针铁矿	泡铋矿	云母
锌砷黝铜矿	白铁矿	铋锌黝铜矿	绢云母	铁白云石	锆石	自然铜	赤铜矿	方解石
方铅矿	蓝辉铜矿	黝锡矿	高岭石	方解石		自然铅	铅矾	玉髓
闪锌矿		辉钼矿	多水高岭石	硅灰石		辉银矿	钼铅矿	
黄铜矿		磁铁矿		方柱石		银金矿	菱锌矿	
毒砂		硫铜锡锌矿				自然银		
自然金		碲铅矿						
银金矿		斑铜矿						
自然银								
金银矿								

2.3　矿物成分及结构构造

本矿床中矿物多达 51 种,其中金属矿物 35 种(表 2)。矿石结构主要有:粒状结构、微晶结构、交代结构、包含结构、固熔体分离结构以及重结晶粗晶 - 巨晶结构等;矿石构造有:块状、浸染状、斑点状、条纹条带状以及细脉状、网脉状和破裂 - 角砾状构造等。

2.4　金、银赋存状态及嵌布特征

银以自然元素及金银互化物、含银硫化物形式存在。前二者主要为自然银,其次为金银矿及银金矿,多呈团粒状、角砾状、叶片状赋存于黝铜矿、方铅矿、黄铁矿晶粒间,黝铜矿与黄铁矿、方铅矿接触处,脉石矿物与方铅矿、闪锌矿、黝铜矿接触处,有的呈浸染状散布于黝铜矿中。在氧化带中自然银与水针铁矿构成同心胶纹状构造、或沿水针铁矿裂隙充填。上述三种银、金矿物的粒径为 0.01～0.30mm。含银硫化物主要为黝铜矿,一般含银 2%～7%,最高达 9.4%,银以类质同像状态存在(表 3)。金以自然金及金银互化物出现,其嵌布形式主要为裂隙金、晶隙金,少量包体金,其粒径为 0.003～0.128mm。

表 3　鸡冠石银(金)矿床矿石矿物电子探针分析结果(据 321 地质队,1991)

Table 3. Electron microprobe analyses of ore minerals in the Jiguanshi silver (gold) deposit

矿物名称	黄铁矿	黄铜矿	闪锌矿	黝铜矿[1)]	黝铜矿[2)]	黝铜矿[3)]	方铅矿
样品数	17	5	12	14	13	6	9
Fe	45.79	34.12	3.03	1.58	2.13	2.27	0.23
S	52.22	28.29	31.72	24.75	26.91	26.44	12.31
Co	0.01	34.19	0.00				0.008
Ni	0.00	0.01	0.14				0.009
As	0.09	0.01	0.16	5.23	15.14	10.37	0.03
Sb	0.00	0.00	0.10	20.34	5.25	11.99	0.15
Se	0.02	0.05	0.01				0.199
Te	0.00	0.02	0.01				0.036
Cu	0.03	0.01	0.75	36.898	41.648	40.46	0.715
Au	0.01	0.11	0.13	0.028	0.049	0.055	0.034
Ag	0.02	0.00	0.04	3.047	0.293	0.433	0.601
Zn		0.02	62.36	5.76	5.52	5.41	0.258
Pb							83.36

注:1) 含锌锑黝铜矿; 2) 含锌砷黝铜矿; 3) 含锌砷锑黝铜矿。　测试单位:南京大学地科系中心实验室。

2.5　围岩蚀变

不同矿体中矿石的矿物组合之间有密切的地球化学亲缘关系,它们的形成都统一于同一的夕卡岩热液成矿活动之中,是同一(成岩)成矿热流体在不同构造 - 围岩条件下阶段性演化的产物。浅部脉状矿体的赋存围岩为石英二长闪长岩,最具特征性的蚀变带为黄铁绢英岩化带,其外为发育强度逐渐减弱的钾长石化带。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在深部接触带矿体和大理岩层间破碎(滑脱)带中的矿体近侧,夕卡岩化强烈,形成了明显的夕卡岩化带,按矿物 - 化学成分分带现象比较清楚。接触带两侧的夕卡岩化带,由岩体向外可清楚分为:内夕卡岩带、石榴子石透辉石夕卡岩带、磁铁矿化带、硫化物矿化带和夕卡岩化大理岩带等。

2.6 成矿期和成矿阶段

总的来说,夕卡岩和不同类型矿体的形成,其阶段性演化比较清楚,从早期到晚期,可划分为下列三个成矿期和四个主要成矿阶段:夕卡岩期、热液期和表生期;夕卡岩阶段、氧化物 - 硫化物阶段、石英 - 硫化物阶段、石英多金属硫化物 - 碳酸盐阶段和氧化阶段。

3 成矿地球化学特征

3.1 微量元素特征

根据对不同阶段的主要成矿元素的电子探针分析结果,可研究不同成矿阶段的成矿特征。表 4 列出了夕卡岩阶段和氧化物 - 硫化物阶段主要成矿元素的电子探针分析结果。从表 4 可看出,Au、Ag 含量均较低,表明这两个阶段与金、银矿化没有直接关系。

表 4 钙铁榴石和磁铁矿中的主要成矿元素

Table 4. Main ore-forming elements in andradite and magnetite

元素 / 矿石	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Mo	Sn	As	S	F	Cl
	($\times10^{-9}$)		($\times10^{-6}$)								
钙铁榴石	10	580	250	24	91	175	7.4	7.5	100	792	440
磁铁矿	180	920	820	20	500	2	痕量	58.2	800	未分析	未分析

测试单位:南京大学地科系中心实验室(1994)。

石英 - 硫化物阶段和石英 - 多金属硫化物 - 碳酸盐阶段与金、银、铜多金属的富集成矿直接相关。石英 - 硫化物阶段,是铜的主要成矿时期,伴随有较富的金、银矿化(表 5)。黄铜矿包裹体的测温(爆裂法)结果表明,其大量生成在 306 ℃,与之伴生的石英的生成温度较高,达 360 ℃(流体包裹体均一法)。本阶段主要硫化物矿物的大致生成顺序是:黄铜矿(辉钼矿) →胶黄铁矿、黄铁矿 →方铅矿 → 闪锌矿 →毒砂 →黝锡矿、铋黝铜矿 →金银系列矿物。

在石英 - 多金属硫化物 - 碳酸盐阶段,所生成的简单硫化物的种类与石英 - 硫化物阶段相似,金银系列矿物亦相似,但硫盐矿物不仅种类较多,而且数量也明显增多,金、银矿化程度进一步加强(表 6)。本阶段的主要特点是:成矿温度较低,方铅矿和黄铁矿的形成温度分别为 208 ℃和 137 ℃(爆裂法)。

表 5 早期硫化物的电子探针分析结果(%)

Table 5. Electron microprobe analyses of early-stage sulphides (%)

矿物	黄铁矿	黄铁矿	黄铜矿	黄铜矿	毒砂	毒砂	毒砂	闪锌矿	闪锌矿	方铅矿	方铅矿	黝锡矿	铋砷黝铜矿
	(1)	(2) *	(1)	(2) *	(1)	(1) *	(2) *	(1)	(1) *	(1)	(1) *	(1)	(1)
Au	0.05	1.39 #	0.0008	7.4 - 1.86 #	0.06	33.7 #	5.26 #	0.045	0.438 #	-	15.34 #	0.1779	-
Ag	0.015	36.9 #	0.107	101.9 #	0.05	197.0 #	8.6 #	0.14	1290 #	3.61	6270 #	-	0.11
Cu	0.065	0.36	34.39	33.63	0.03	0.097	0.01	0.515	0.239	3.59	0.163	39.60	40.07
S	53.50	53.5	343.12	35.03	19.85	20.80	22.35	32.36	31.60	12.51	13.80	28.89	26.93
Fe	45.41	45.57	28.29	30.12	33.87	35.70	35.33	4.59	5.84	1.82	0.404	11.02	0.42
As	0.16	0.21	-	163.2 #	44.26	41.73	41.96	0.23	0.414	0.29	0.235	0.82	11.72
Sb	0.01	-	0.05	7.65 #	0.03	-	-	0.002	0.082	1.27	0.0074	0.27	4.13
Bi	0.03	-	0.06	81.2 #	0.005	-	-	0.075	-	5.31	-	-	7.57
Pb	-	0.23	0.30	0.025	-	0.62	0.087	0.23	1.05	70.10	82.73	0.27	0.73
Zn	0.01	0.02	0.02	0.37	0.009	0.487	0.004	61.47	57.78	0.37	1.71	3.34	6.61
Se	0.06	0.002	0.02	0.007	-	0.0001	-	0.008	0.0001	1.08	0.026	0.104	-
Te	-	0.001	0.02	0.001	0.04	0.0007	-	0.01	0.0007	0.05	0.05	-	-
Ni	-	0.002	-	-	0.001	0.001	0.002	-	0.001	-	0.002	-	-
Co	-	0.024	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0023	0.023	-
Cd	-	-	-	-	0.15	-	-	0.185	0.006	-	-	-	-
Sn	-	-	0.06	-	0.02	-	-	0.015	-	-	-	11.70	0.09
合计	99.31	99.92	96.91	99.38	98.38	99.44	99.74	99.88	96.90	100.0	99.19	96.21	98.38

注:(1)浅部脉状矿体中;(2)深部矿体中;* 原子吸收光谱分析;# 表示含量为 $\times10^{-6}$。 测试单位:南京大学地科系中心实验室(1994)。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 6　晚期硫化物的电子探针分析结果(%)

Table 6. Electron microprobe analyses of late-stage sulphides (%)

矿物		Au	Ag	Cu	S	Fe	As	Sb	Bi
黄铁矿	(1) *	0.14#	27.7#	0.02	51.26	45.09	0.09	0.003	-
角砾状黄铁矿	(1) *	0.22#	6.7#	0.002	51.51	46.48	-	-	-
粗晶黄铁矿	(1) *	0.14#	6.5#	0.01	52.22	45.89	0.033	-	-
方铅矿	(1)	0.05	0.27	0.17	12.16	0.03	-	0.01	0.32
方铅矿	(2)	-	0.104	0.026	12.94	0.004	-	-	0.126
闪锌矿	(1)	0.04	0.13	0.78	30.89	0.82	0.11	0.22	0.19
银锑黝锡矿	(1)	0.17	8.08	33.13	23.17	2.47	2.37	25.82	0.08
含银锑黝锡矿	(1)	0.03	3.38	36.30	25.37	1.67	4.23	22.27	0.06
锌锑黝锡矿	(1)	0.04	1.265	39.20	25.42	1.67	8.16	14.95	0.32
锌砷黝锡矿	(1)	0.05	0.42	41.56	26.87	2.25	15.16	6.17	0.12
锌砷黝锡矿	(2)	0.068	0.656	39.47	26.33	1.24	12.25	8.21	0.09
硫铜锡锌矿	(1)	0.022	0.04	28.66	25.59	0.47	-	23.48	-
车轮矿	(1)	0.044	-	13.09	18.92	0.025	0.28	-	1.26
辉铅铋矿	(1)	-	9.35	0.43	13.98	0.016	-	1.05	39.93
含银硫铋锑铅矿	(1)	-	2.568	1.34	17.36	0.04	0.79	12.78	22.72
斜方辉铅铋矿	(1)	0.042	0.865	5.14	16.32	0.011	0.46	3.47	39.77

矿物		Pb	Zn	Sn	Se	Te	Ni	Co	Σ
黄铁矿	(1) *	0.02	0.015	-	4#	-	1#	0.02	96.51
角砾状黄铁矿	(1) *	0.007	0.003	-	3#	-	4#	0.001	98.00
粗晶黄铁矿	(1) *	0.021	0.006	-	3#	5#	-	0.004	98.18
方铅矿	(1)	84.98	0.28	0.08	0.06	0.03	-	-	98.50
方铅矿	(2)	83.02	-	-	0.026	0.025	-	-	96.28
闪锌矿	(1)	0.34	63.46	0.04	0.01	0.002	0.004	0.003	97.04
银锑黝锡矿	(1)	0.09	4.34	0.04	-	-	-	-	99.76
含银锑黝锡矿	(1)	0.07	5.68	0.02	-	-	-	-	99.08
锌锑黝锡矿	(1)	0.17	5.86	0.10	-	-	-	-	95.48
锌砷黝锡矿	(1)	0.18	5.46	0.17	-	-	-	-	98.41
锌砷黝锡矿	(2)	1.88	6.51	-	-	-	-	-	96.70
硫铜锡锌矿	(1)	0.21	15.10	22.63	0.05	-	-	-	92.77
车轮矿	(1)	42.42	0.028	0.014	-	-	-	-	99.56
辉铅铋矿	(1)	28.83	0.41	-	2.06	0.26	0.01‘2	-	96.43
含银硫铋锑铅矿	(1)	42.23	-	0.06	-	-	-	-	100.09
斜方辉铅铋矿	(1)	31.64	0.002	0.06	-	-	-	-	97.78

注:(1) 浅部脉状矿体中;(2) 深部矿体中; * 原子吸收光谱分析; # 表示含量为 $\times 10^{-6}$。　测试单位:南京大学地科系中心实验室(1994)。

表 7　金-银系列矿物的电子探针分析结果(%)

Table 7. Electron mioroprobe analyses of gold-silver series minerals (%)

矿体	矿物	Au	Ag	Cu	S	Fe	Se	Te	Σ	成色
浅部脉状矿体	自然金(Ⅰ)	83.1784	12.3842	0.2187	0.0684	0.1090	1.7711	-	97.7298	870.4
	自然银(Ⅰ)		100.1787	0.7993	-	-	-	0.1515	101.1296	-
	自然金(Ⅱ)	86.1427	12.7208	-	-	-	0.1010	0.0365	98.9101	871.3
	银金矿(Ⅱ)	71.2077	24.6202	-	-	-	0.0187	0.0586	95.9052	743.1
	自然金(0)	83.9727	13.8722	-	-	-	-	-	97.8449	858.2
	银金矿(0)	75.8804	20.2184	-	-	-	-	-	96.0988	789.6
	金银矿(Ⅱ)	44.8350	47.940	-	-	-	0.0150	0.0750	92.8650	483.2
	自然银(Ⅱ)	0.0195	98.6559	-	0.0113	-	-	0.1008	98.7762	-
	金银矿(0)	41.4084	57.1900	-	-	-	-	-	98.5984	420.0
深部似层状矿体	自然金(Ⅰ)	82.7078	15.1786	0.0404	0.0464	0.0238	1.5450	-	99.5420	844.9
	金银矿(Ⅰ)	45.5070	48.7878	1.2540	-	-	-	0.1231	95.6719	482.6
	自然银(Ⅰ)	0.0026	98.8828	1.079	1.1675	0.0128	-	0.0910	101.2357	-
	自然金(Ⅱ)	86.7007	11.6155	-	-	-	0.0114	0.0198	98.3474	881.8
	银金矿(Ⅱ)	68.8948	28.5168	-	-	-	0.0074	0.0201	97.4391	707.2
	金银矿(Ⅱ)	40.2247	55.6731	-	-	-	-	0.0491	95.9469	419.4
	自然银(Ⅱ)	0.2068	94.0170	-	0.7454	-	-	-	94.9692	-

注:(0) 世代不明;(Ⅰ) 早世代;(Ⅱ) 晚世代。　测试单位:南京大学地科系中心实验室(1994)。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

矿石中的银和金,主要以独立矿物相(可见金、银)的形式存在,包括自然银、自然金、银金矿、金银矿(表 7),含银、金的硫化物也占有重要地位。

独立的银、金矿物和含 Au、Ag 低的硫化物和含 Ag 硫盐矿物,主要形成于热液成矿期的中、晚阶段,是伴随贱金属硫化物成矿活动的产物。银、金的矿化富集至少可分为两个阶段,大致分别相当于前述石英 - 硫化物阶段和石英 - 多金属硫化物 - 碳酸盐阶段的晚期。就成矿强度而言,早期明显要弱一些,特别是对银矿化来说更为明显。

3.2 稀土元素特征

从本矿床的稀土元素分析结果(表 8)可以看出,稀土总浓度从3.19 $\times10^{-6}$到109.248 $\times10^{-6}$,变化很大,以石榴子石夕卡岩最高,以块状硫化物矿石最低,说明稀土元素发生了有效的分馏,石榴子石成为主要的稀土元素富集矿物;轻、重稀土元素总浓度比值为7.73～12.81,接近矿区内辉石二长闪长岩(ΣLREE/ΣHREE = 11.86),具有明显的同源分异特征;石榴子石夕卡岩具有弱的铕负异常(δEu = 0.90),而不同类型的夕卡岩型金矿石除个别外大都具有明显的铕正异常(δEu = 1.45～5.55),这说明了矿石稀土元素分布的不均匀性;稀土元素分馏程度指数$(La/Yb)_{CN}$表明,石榴子石夕卡岩的$(La/Yb)_{CN}$ = 10.48,硫化物矿石的$(La/Yb)_{CN}$ = 9.18～20.88～33.80,说明夕卡岩的分异及稀土元素分馏程度的不断提高。

表 8 鸡冠石银(金)矿床石榴子石夕卡岩、金矿石稀土元素组成特征表 ($\times10^{-6}$)

Table 8. REE contents of garnet skarn and gold ores in the Jiguanshi silver (gold) deposit

元素 / 样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
石榴子石夕卡岩	23.625	42.944	5.879	22.912	4.140	1.186	3.172	0.489	2.340	0.434
SK-25	1.021	1.808	0.155	0.617	0.111	0.093	0.157	0.022	0.083	0.018
SK-30	14.695	26.704	2.940	10.232	2.237	1.481	1.941	0.362	1.291	0.191
SK-31	2.556	3.926	0.420	1.398	0.287	0.194	0.246	0.037	0.172	0.033
KS-24	2.98	4.74	0.94	1.56	0.35	0.094	0.165	0.052	0.276	0.073
KS-26	0.673	1.342	0.146	0.479	0.116	0.050	0.120	0.018	0.093	0.022
KS-27	8.691	13.572	1.641	5.340	1.117	1.339	0.959	0.128	0.751	0.147
KS-28	14.428	23.865	2.677	9.734	2.705	4.491	2.829	0.511	2.116	0.307
KS-29	4.81	9.121	1.067	3.729	0.867	0.426	0.838	0.136	0.659	0.118

元素 / 样品	Er	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE/ΣHREE	δEu	δCe	$(La/Yb)_{CN}$
石榴子石夕卡岩	1.020	0.991	0.116	109.24	11.76	0.90		10.48
SK-25	0.041	0.036	0.020	4.18	10.09	2.40	0.947	16.79
SK-30	0.418	0.285	0.064	62.84	12.81	2.17	0.951	33.8
SK-31	0.082	0.085	0.035	9.470	12.74	2.26	0.887	19.90
KS-24	0.164	0.162	0.040	11.256	8.94	0.90	0.34	17.68
KS-26	0.033	0.045	0.032	3.19	7.73	1.45	0.89	9.13
KS-27	0.395	0.373	0.070	34.52	11.23	4.41	0.75	13.85
KS-28	0.622	0.411	0.062	64.75	8.44	5.55	0.80	20.88
KS-29	0.252	0.211	0.059	22.30	8.79	1.70	0.84	13.18

注:SK—夕卡岩;KS—矿石。 测试单位:南京大学地科系中心实验室(1997)。

3.3 稳定同位素特征

3.3.1 硫同位素特征 矿床中各矿物的$\delta^{34}S$值变化范围较宽,离散程度较大但其组成频率分布图仍呈塔形分布,两侧仅出现较小的峰值(图 2)。上部矿体顶板的黄铁矿化蚀变石英闪长岩中黄铁矿的$\delta^{34}S$值为0.47‰,接近于零,基本上代表了石英闪长岩岩体的$\delta^{34}S$值。黝铜矿为主要成矿作用阶段中结晶沉淀的产物,是银的载体矿物,与金银独立矿物密切共生,其$\delta^{34}S$均为负值,绝对值也较大(-10.18‰～-4.6‰),充分显示了成矿过程中地下循环水及地层成分的加入而致使成矿介质条件发生的变化。不同晶形、不同粒度黄铁矿的$\delta^{34}S$值呈规律性变化(表 9),由+0.47‰～+8.5‰,反映出黄铁矿再生加大过程中$\delta^{34}S$值由小逐渐增大。黄铁矿的热导性均为 - N 型(电子型),仅晚期的变胶状黄铁矿为 + P 型(空穴型),反映出该矿床以岩浆热液为主的成因标志。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.3.2　氢、氧同位素特征　　成矿早期成分单一的石英黄铁矿矿石中石英的$\delta^{18}O$值为 +8.59‰～+13.86‰,平均为 +11.23‰,晚期多金属硫化物金银矿石中石英的$\delta^{18}O$值为 +17.97‰,表明从早期到晚期阶段愈来愈富^{18}O。成矿溶液的$\delta^{18}O$～δD关系图(图 3)表明,成矿溶液以岩浆水为主,但有大气降水加入,特别是在成矿晚期。

3.3.3　碳、氧同位素特征　　由图 4 可知,以菱铁矿为主的黄铁菱铁矿矿石显然属沉积成因,以黄铁矿为主含少量菱铁矿的角砾状黄铁矿矿石具叠加改造特征,而多金属金银矿石中的方解石亦明显为叠加改造产物,说明晚期碳酸盐化阶段的热液成分中掺入了大量地层(T_2l)成分。

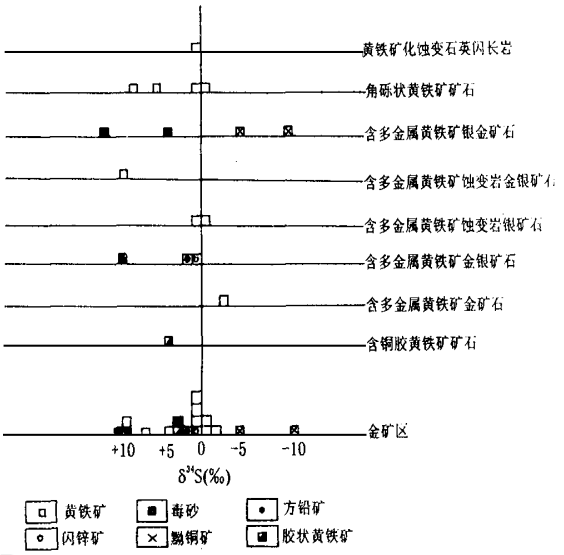

图 2　鸡冠石银(金)矿床硫同位素组成频率分布图

Fig. 2. Sulphur isotopic composition of the Jiguanshi silver (gold) deposit.

1. 黄铁矿; 2. 毒砂; 3. 方铅矿; 4. 闪锌矿; 5. 黝铜矿; 6 胶状黄铁矿

4　流体成分及成矿温度

4.1　流体成分

由石英包裹体成分分析结果(表 10)可知,成矿溶液早期为岩浆分异产物,为 NaCl - KCl - H_2O 体系,成矿过程中有 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 大量加入。到石英、硫化物成矿阶段,成矿溶液的基本特征是$Na^+ > K^+$,$Ca^{2+} > Mg^{2+}$,但浅部矿体围岩发生过较强的钾长石化,深部矿体中亦出现钾长石和金云母(或绿云母),表明成矿溶液仍以岩浆分异产物为主。在石英、硫化物阶段,成矿溶液的 pH 值为7.01～7.023,属中—弱碱性;Eh 值为40.29～27.27mV,呈弱氧化状态。硫化物大量沉淀后,成矿溶液变为弱酸性,并由弱氧化状态变为还原状态,导致大量的金、银沉淀,从而形成了以银为主的、与金铜多金属共生的鸡冠石银(金)矿床。

表 9　不同结晶形态黄铁矿的$\delta^{34}S$、热电系数特征表

Table 9. $\delta^{34}S$ and thermal electricity characteristics of different crystal forms of pyrite

矿石类型	黄铁矿结晶形态	硫同位素特征		热电系数	
		$^{32}S/^{34}S$	$\delta^{34}S$(‰)	导型α, ±μV/℃	取定值
黄铁矿化蚀变石英闪长岩	立方体、细晶	22.210	0.47		
角砾状黄铁矿	五角十二面体、细晶	22.110	4.96	- N 型	- 264.5
角砾状黄铁矿	五角十二面体、粗晶	22.052	7.56	+ P 型、- N 型	136.3 - 148.7
含多金属黄铁矿化蚀变岩型金银矿石	五角十二面体、巨晶	22.031	8.52	- N 型	- 273.1
含铜胶状黄铁矿	胶状、变胶状	22.149	3.21	+ P 型	73.7

表 10　鸡冠石银(金)矿床石英中气液包裹体成分 (据 321 地质队,1992)

Table 10. Chemical compositions of gas-liquid inclusions from quartz in the Jiguanshi silver (gold) deposit

样品号	pH	Eh(mV)	液相								气相				
			单位	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	单位	CO	CH_4	CO_2	H_2O
86 - 44	7.01	40.29	$\times10^{-6}$	0.46	0.51	0.07	0.04	2.19	0.13	0.59	0.25	mol/100g	28.09	1.94		169.67
			g.eq.%	28.88	54.47	8.57	8.08	55.58	10.59	25.76	8.07					
86 - 178	7.23	27.27	$\times10^{-6}$	0.09	0.36	0.29	0.12	3.71	0.11	0.38	0.86	mol/100g	2.98		4.31	68.48
			g.eq.%	1.89	38.41	35.49	24.21	63.86	6.08	11.26	18.81					

测试单位:地科院矿床所实验室。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

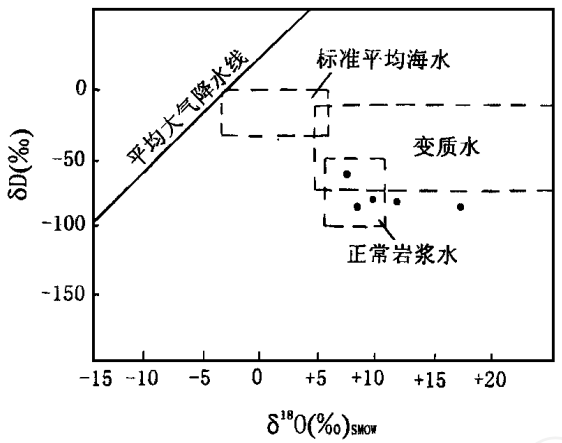

图 3 鸡冠石银(金)矿床成矿溶液 $\delta^{18}O$ - δD 关系图

Fig. 3. $\delta^{18}O$ - δD diagram of ore-formring solution in silver (gold) deposit.

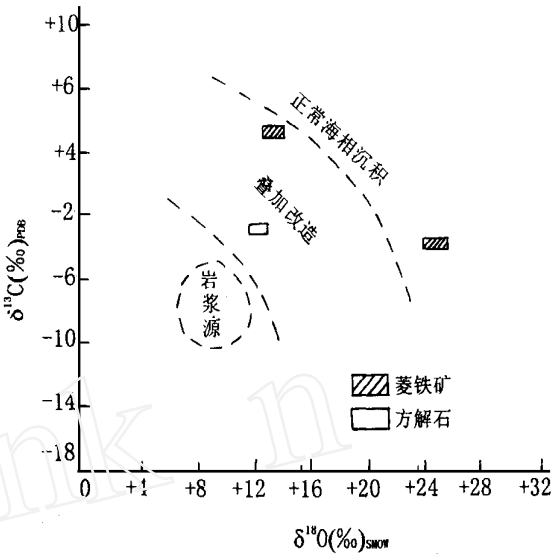

图 4 鸡冠石银(金)矿床 $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ 变化与矿化关系图

Fig. 4. $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ diagram as a function of mineralzation in the Jiguanshi the Jiguanshi silver (gold) deposit.

4.2 成矿温度

根据各成矿阶段的矿物组合分析及矿物包裹体测温资料,鸡冠石银(金)矿床经历了高→低温的成矿过程(表 11)。

表 11 鸡冠石银(金)矿床矿物包裹体测温结果(据 321 地质队,1992)

Table 11. Temperatures of mineral inclusions in the Jiguanshi silver (gold) deposit

成矿阶段	矿石类型	测试矿物名称	温度范围(℃)	测定方法
高、中温热液阶段	蚀变石英闪长岩	黄铁矿	300～350	爆裂法
		石英	325	均一法
	角砾状黄铁矿金银矿石	石英	290～335	均一法
		黄铁矿	250～300	爆裂法
	多金属黄铁矿金银矿石	毒砂	300～350	爆裂法
		石英	290～330	均一法
		黄铜矿	280～380	爆裂法
		闪锌矿	260～320	爆裂法
中温热液阶段	含多金属黄铁矿金银矿石	毒砂	200～280	爆裂法
		黄铁矿	190～280	爆裂法
	多金属黄铁矿蚀变岩银矿石	方铅矿	200～270	爆裂法
		黝铜矿	200～310	爆裂法
中、低温热液阶段	多金属黄铁矿金银矿石	黄铁矿	170～240	爆裂法
		黄铁矿	180～250	爆裂法
		方铅矿	170～220	爆裂法

5 成矿机制及矿床成因

总体说来,本矿床的成因机制是:岩浆侵入就位结晶后,残余的岩浆水与地壳循环水混合,造成携带大量成矿元素的成矿溶液充填到构造破碎带中,在一定的物理化学条件下,促使其沉淀成矿。

流体中大量的成矿元素 Cu、Pb、Zn、Au、Ag、Fe 及半金属元素 As、Sb、Bi,常与 Cl 或 S 结合成配离子存在于偏碱性溶液中。Au、Ag 在溶液中可能呈 $[AuCl_2]^-$、$[AgCl_2]^-$ 或 $[Au(AsS_3)]^{2-}$、$[Au(SbS_3)]^{2-}$ 的配合物形式迁移。当热液充填到构造破碎带时,压力骤减,热液呈沸腾状态,K^+、Na^+ 离子进入围岩,引起钾、钠的交代作用,

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

且 F^-、Cl^-、H_2O 与围岩作用,产生方柱石、绿帘石等变质矿物,同时从围岩中带入 SiO_2、Ca^{2+}、Mg^{2+} 等成分,使热液 pH 值降低,体系中配合物逐渐分解。约在 360 ℃左右,部分 As、Fe 与 S 结合,沉淀出毒砂和黄铁矿,$[AuCl_2]$ 逐渐还原成 Au,部分 Au 与 As 一起进入毒砂的晶格,也有呈显微微粒被吸附在晶体的生长面上,随着晶体增大,Au 被包裹在内;Cu 与 Zn、S、Fe、Sn 在高温时构成固熔体,能带入 Au 和 Ag,当温度逐渐下降,固熔体被分离成磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、硫铜锡锌矿、黝锡矿等。由于以上矿物的沉淀,体系中成矿元素减少,S 逸度相对增高,pH 值降低,当温度降至 250 ℃时,$[Au(AsS_3)]^{2-}$、$[Au(SbS_3)]^{2-}$ 也不稳定,Au(Ag) 被还原出来。当溶液中 Sb 和 As 的硫配离子浓度增高时,S、As、Sb 便与残余的 Cu、Fe、Zn 等离子结合,并可与先结晶的矿物中的有关成分结合,构成成分复杂的硫盐矿物;当 Sb 浓度大于 As 浓度时,结合成含锌锑黝铜矿,其晶胞体积较大,允许离子半径较长的 Ag 置换 Cu^+。当 As 浓度增高时,先结晶的含锑砷黝铜矿晶胞体积较小,Ag 不易替代 Cu^+,多被吸附在晶体生长面上,因此,Cu 在一价位占绝对优势;而多余的 Sb 则可能与 Cu、Pb、S 等结合成车轮矿。溶液中的金除了以自然金显微包体的形式存在于黝铜矿中外,部分也可在晶格里替代 Cu^{2+}。

在成矿晚期,矿床受来自围岩的地下热环流作用,进入碳酸盐阶段,温度随之下降,由于成矿溶液中含有大量 HCO_3^- 及 H_2O,早期碳酸盐呈云雾状交代近矿围岩中的夕卡岩及石英闪长岩,同时体系中氧逸度升高,使早沉淀的磁黄铁矿分解成变胶状黄铁矿及磁铁矿,而后者与 HCO_3^- 结合成菱铁矿。

耶洛奈夫(1961)在其研究成果的论述中提到:"假定早期形成的黄铁矿、毒砂吸收的 Au 和 Ag 是作为硫化矿物生长面上的原子层,温度较低时,Au 和 Ag 等的存在将使黄铁矿和毒砂的晶格变形,晶体的自由能量因而随之升高,为使体系中自由能量降到最低限度,Au 和 Ag 就向附近化学势低的位置——裂隙和颗粒边界迁移,在那里结合成银金矿"。因此,在本矿床中所见的晶隙金(银)及裂隙金(银),均可用以上论述来解释,而这些金、银的迁移过程可能是在碳酸盐阶段进行的。当体系呈弱碱性时,从矿物中迁移到边界的金、银部分可成配合物进入溶液迁移。最后,随着 $FeCO_3$ 沉淀,SiO_2 增多,促使 Au、Ag 被还原呈细微胶状沉淀在菱铁矿或石英中。因此,在本矿床中除包体银(金)外,尚有相当数量的间隙银(金),其中有的分布在硫化(硫盐)矿物与脉石间或脉石粒间。而脉石矿物为菱铁矿、石英及粘土矿物。所以,碳酸盐阶段应为 Au、Ag 的迁移、富集的主要阶段。

由前述可知,本矿床由于其形成经历了由接触交代夕卡岩→高、中温热液→中、低温热液成矿的基本连续的演变,应属接触交代夕卡岩型矿床,但银、金的矿化富集主要发生在中、低温阶段,故称为夕卡岩 - 中低温热液充填 - 交代型矿床。

参 考 文 献

[1] 张理刚,稳定同位素在地质科学中的应用,西安,陕西科学技术出版社,1985。
[2] 于津生等,中国同位素地球化学研究,北京,科学技术出版社,1997。
[3] 赵振华,微量元素地球化学原理,北京,科学技术出版社,1997。
[4] 卢焕章等,包裹体地球化学,北京,地质出版社,1990。
[5] 张文淮等,流体包裹体地质学,武汉,中国地质大学出版社,1993。
[6] 唐永成、吴言昌、储国正等,安徽沿江地区铜金多金属矿床地质,北京,地质出版社,1998。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

GEOLOGY AND GEOCHEMISTRY OF THE JIGUANSHI SILVER (GOLD) DEPOSIT IN TONGLING, ANHUI

Chu Guozheng[1,2)] Wu Yanchang[2)] Liu Guanghua[2)]
Zhou Daoyu[2)] Hu Fu'e[2)] Shi Dongfang[2)]
1) (China University of Geosciences, Beijing 100083)
2) (Geology and Mineral Resources Bureau of Anhui, Hefei 230001)

Abstract

The Jiguanshi deposit is a medium-sized silver (gold) deposit recently discovered in the Tongling area, Anhui. Orebodies are complicated in mineral composition, with 51 metallic minerals already identified. The formation of the deposit might be divided into three metallogenic periods and four ore-forming stages. This paper deals mainly with the trace element, hydrogen, oxygen, sulfur and carbon isotopic compositions of the Jiguanshi silver (gold) deposit. The results show that Ag and Au minerals were formed in the middle and late stages of the hydrothermal metallogenic period; the metallogenic material mainly came from pyroxene monzodiorite; magmatic water was dominant at the major stage of mineralization and meteoric water was dominant at the late stage. Metallogenic fluid is of the Na-KCl-H_2O type. The Jiguanshi is a deposit of the skarn moderate-low temperature hydrothermal filling metasomatic type.

Key words: Jiguanshi silver (gold) deposit; trace element; stable isotope; fluid inclusion

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net