

吉林小西南岔金铜矿床的 金属矿物及矿石特征^①

陈殿芬 周文茂

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京)

提 要: 小西南岔矿床是与燕山期花岗岩有关的斑岩矿床, 以金、铜为主, 伴有银、铋矿化。金属硫化物主要是黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿。金矿物是金-银系列的自然金、银金矿及金银矿。金的成色低, 平均成色 728, 且变化在 305~993 这一较大范围内。另外, 还发现了碲银矿、碲银铋铅矿、自然铋、赫梯铋矿、富硫铋铅矿等多种银、铋矿物。成矿早期只有微弱的铜(钼)矿化, 大量金和铜富集于成矿中期(210~475℃), 而银、铋矿化则出现在成矿作用晚期(160~240℃)。

关键词: 金铜矿床 金属矿物 矿物共生组合 吉林小西南岔

金属矿物及矿石特征的研究可为矿床成因、矿床的合理评价和开发利用提供可靠依据。为此, 我们进行了大量显微镜观察, 并对有代表性的矿物做了化学分析、电子探针分析及 X 射线衍射分析。另外, 我们还用 MPV-1 型显微光度计测定了矿物的反射率和颜色指数。矿物的显微硬度是用德国莱兹自动显微硬度计测定的。

1 地质概况

小西南岔金铜矿床位于华力西褶皱带的兴安-内蒙地槽, 矿床受中生代形成的东西向敦化-汪清-春化大断裂控制。区内出露的地层有下古生界青龙村群、二叠系柯岛组及开山屯组等, 其岩性主要是角闪片岩、粗砂岩、板岩及角岩, 零星分布于矿区内。区内分布最广的是华力西期斜长花岗岩(γ_1^3)及闪长岩(δ_1^3), 燕山期花岗岩(γ_2^3)只出现于矿区西部。燕山期花岗斑岩地表未出露, 系北山矿段西部 10 号脉群下部的隐伏岩体, 而燕山期闪长玢岩($\delta\mu$)在矿区南山矿段和北山矿段均有分布。

矿体受北北西向压性断裂及其次级断裂控制。矿体主要由充填于裂隙的含金石英脉和两侧围岩中的细脉浸染状矿化体组成, 其形态以单脉和复脉为主, 网脉和细脉浸染矿体占次要地位。矿体主要产于蚀变闪长岩、片岩及角岩中。围岩蚀变发育, 主要蚀变有: 钾长石化、黑云母化、阳起石化、透闪石化、硅化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化。后四者与金、铜矿化关系密切。

① 国家自然科学基金资助项目 (49070102)

陈殿芬, 女, 1937 年生, 副研究员, 从事金属矿物及矿石研究。邮政编码: 100037

1994-5-29 收稿, 1994-12-20 修改回

成矿温度在 500~160℃ 范围内, 主要成矿温度为 280~210℃, 成矿压力 18~68 MPa, 成矿深度约几百米至 2 公里。矿床成因属与燕山期花岗斑岩有关的斑岩矿床。

2 矿石的矿物成分

矿石的矿物成分复杂, 已查明金属矿物有 30 余种, 非金属矿物 20 多种。按矿物成因可分为内生矿物、表生矿物和成矿前原岩残留矿物, 其中大部分矿物是内生成矿期形成的。矿物的种类有单质(自然金、银金矿、金银矿、自然铋、自然铜), 硫化物及硫盐(黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、毒砂、胶黄铁矿、闪锌矿、白铁矿、方黄铜矿、方铅矿、斑铜矿、铜蓝、富硫铋铅矿), 碲化物(碲银矿、赫碲铋矿、硫碲铋铅银矿), 碳酸盐(孔雀石、方解石), 氧化物及氢氧化物(针铁矿、磁铁矿、赤铁矿), 砷酸盐(臭葱石), 硅酸盐(石英、绿泥石、绢云母、阳起石、绿帘石、斜长石、角闪石、黑云母)。金属矿物种类虽多, 但含量并不高, 一般只占矿石总含量的 2%~3% (重量), 其中以黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿为主, 自然金等次之。脉石矿物占矿石总含量 95% (重量) 以上, 主要是石英和方解石, 次为绿泥石、绢云母、阳起石等蚀变矿物, 有时见斜长石、角闪石、黑云母等成矿前原岩的残留矿物。

3 金属矿物的矿物学特征

3.1 金-银系列矿物

一般认为金-银是完全类质同象系列。通常按“四分法”将此系列矿物分为: 自然金 ($Au > 80\%$, $Ag < 20\%$)、银金矿 ($Au 50\% \sim 80\%$, $Ag 20\% \sim 50\%$)、金银矿 ($Au 20\% \sim 50\%$, $Ag 50\% \sim 80\%$)、自然银 ($Au < 20\%$, $Ag > 80\%$)。目前查明本矿床金-银系列矿物有: 自然金、银金矿及金银矿, 以自然金为主 (表 1)。

经电子探针分析, 自然金中金为 81.77%~99.27%, 常含杂质元素, 其中银是最常见的组分 (表 1)。银含量变化在 0.27%~17.63% 范围内, 大多数自然金中银含量为 11.35%~17.63%。除银外, 自然金中还含铜 (0.25%~0.73%)、碲 (0.11%~0.29%)、铁 0.08%~0.2% 等微量元素, 其中以铜最为特征, 几乎自然金中都含微量铜, 这主要是因为成矿溶液中铜含量高, 除形成大量铜矿物外, 可以有微量铜进入自然金中。自然金的成色变化于 872~993 之间, 但大多数自然金的成色为 820~883。这与郑斗范等^①的研究一致。据他们报导, 本矿床 I、II、III、IV、V 号矿体自然金的平均含量是: Au 87.28%、Ag 12.34%, 成色 876。银金矿只做了一个电子探针分析, 含 Au 67.30%, Ag 30.48%, 还含少量 Cu (1.40%)、Fe (0.75%), 成色 673。金银矿中 Au 变化在 30.5%~46.44% 之间, Ag 53.15%~69.37%, 金的成色为 305~464。显然, 本矿床的金-银系列矿物 Au、Ag 含量变化较大, 金的成色变化在 305~993 这一很大范围内, 平均成色低 (728)。金-银系列矿物的这一特征与刺猬沟、闹枝等火山岩型金矿床、德兴斑岩铜矿床类似, 而与其它类型金矿床相差较大 (表 2)。

自然金和银金矿的晶胞参数 a_0 分别为 4.0786Å 和 4.0798Å (中国地质科学院矿床地质研究所林月英测定)。由于 Ag 对 Au 的类质同象置换, 本矿床自然金的晶胞参数比含金量

① 郑斗范、万玉胜、朴涛允, 1983, 吉林省辉南县小西南岔金铜矿床地质特征及成矿规律

为 99.999% 的人造金 ($a_0=4.065\text{\AA}$)^[4] 和海沟金矿床的自然金 ($a_0=4.0667\text{\AA}$)^[3] 都略大, 而银金矿的 a_0 又比自然金的 a_0 大。

表 1 金-银系列矿物的电子探针分析结果

Table 1. Electron microprobe analyses of minerals of gold-silver series

矿物	样品	组分含量 (%)							成色	矿物共生组合
		Au	Ag	Cu	Pb	Fe	Te	总量		
自然金	砂-2-1	99.27	0.27	0.4				99.94	993	自然金+黄铜矿
	砂-2-2	97.22	1.67	0.5				99.39	978	
	砂-1	97.58	1.64	0.68		0.10		100.00	976	
	砂-2-3	88.22	11.35	0.25		0.08		99.90	883	
	N-18①A	87.04	12.06	0.50		0.20		99.80	872	
银金矿	N-18①A	67.30	30.48	1.40		0.75		99.93	673	
自然金	S-14A	86.66	12.31	0.73	0.01		0.12	99.82	868	自然金+碲化物
		81.77	17.63				0.29	99.70	820	
		86.79	12.83	0.25			0.11	99.98	868	
金银矿	砂-2-4	30.50	69.37	0.11				99.98	305	
	砂-1-1	43.99	56.01					100.00	440	
	砂-1-2	32.13	67.87					100.00	321	
	S-14A	46.44	53.15	0.25		0.15		99.99	464	

中国地质科学院矿床地质研究所陈克樵分析

表 2 各类型矿床中金-银系列矿物的成色特征

Table 2. Fineness of minerals of gold-silver series from various types of ore deposits

矿床类型	矿床	金-银系列矿物	金银含量 (%)		金的成色		资料来源
			Au	Ag	变化范围	平均值	
火山岩型金矿床	刺猬沟	银金矿	68.96~76.21	23.73~31.22	687~728	706	①
	闹枝	自然金、银金矿	48.97~95.63	23.73~31.22	505~952	831	
斑岩铜矿	德兴	自然金、银金矿	63.9~95.41	3.8~33.1	639~962	857.5	[1]
变质热液金矿床	漠滨, 沃溪, 黄金洞, 金坑冲	自然金	92.71~99.03	0.35~5.87	940~996	971	[2]
沉积变质-热液金矿床	海沟	自然金	87.29~99.9	0~12.68	873~1000	967	[3]
地下热(卤)水溶滤型金矿床	高家坨	自然金	89.74~98.34	1.49~9.52	903~985	935	[2]

① 吉林省地矿局、长春地质学院联合科研队, 1992, 吉林省汪清县闹枝、刺猬沟金矿床科研报告

自然金和银金矿基本上是显微金和中细粒金, 少量粗粒金, 粒度变化在 0.0025~0.1 mm 范围内, 主要粒度 0.015~0.07 mm。这两种金矿物主要呈椭圆形、长条形, 或他形粒状分布于硫化物、碲化物和脉石矿物中, 其中大约 65% 分布于黄铜矿、磁黄铁矿及黄铁矿中, 25% 分布于自然铋和碲化物中, 只有 10% 左右分布于石英和方解石等脉石矿物中。自然金和银金矿主要呈“晶隙金”分布于上述矿物粒间, 或呈“裂隙金”分布于上述矿物裂隙中 (照片 1、2)。通常, “晶隙金”与周围矿物同时晶出, “裂隙金”比周围矿物晚晶出。

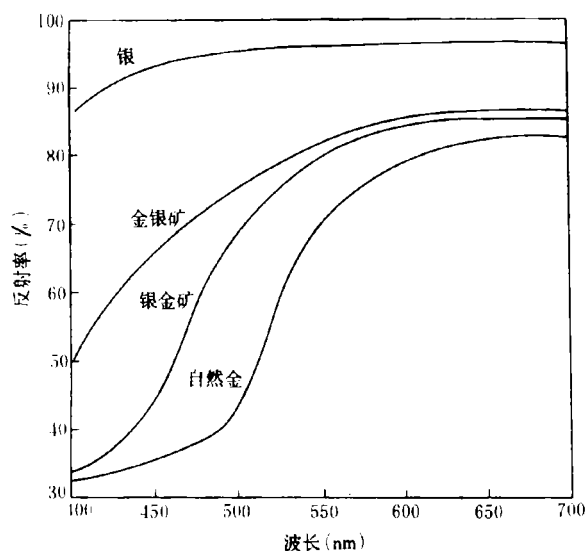


图 1 金-银系列矿物的反射率曲线
Fig. 1. Reflectivity curves of minerals
of gold-silver series.

金银矿的粒度比自然金和银金矿细得多,一般仅 0.002~0.005 mm,仍属显微金范畴。金银矿多呈长条状或弯曲的“蠕虫状”分布于自然金中,或沿自然金颗粒边缘分布,镜下观察二者系同时形成。有时金银矿呈枝叉状分布于黄铜矿微裂隙中,比黄铜矿晚晶出。

金-银系列矿物的光学性质与成色有密切关系。从自然金—银金矿—金银矿,矿物的反射色由金黄色—浅黄色—浅黄白色。矿物的颜色指数和反射率曲线可定量地反映这些矿物的颜色特征。从表 3 和图 1 可看出,它们的主波长(λ_d)为 575~583 nm,都属黄光范畴,从自然金—银金矿—金银矿,其视觉反射率(R_v)相应增高,颜色纯度(P_e)则相应降低,反射光谱曲线朝自然银方向移动,曲线形状愈趋平缓。

表 3 金-银系列矿物的反射率及颜色指数

Table 3. Reflectivities and color indices of minerals of gold-silver series.

反 射 率 (%) 矿 物	波 长 (nm)								颜 色 指 数 (SE)					金的成色	颜色
	405	436	480	526	546	589	644	656	R_v (%)	x	y	λ_d	P_e (%)		
自然金	32.5	34.3	38.2	60.9	69.3	77.6	81.8	82.2	68.2	0.409	0.385	583	42.4	993	金黄
银金矿	34.0	40.0	62.0	75.7	79.4	83.2	84.6	84.8	78.9	0.377	0.388	575	39.2	673	浅黄
金银矿	51.8	62.3	71.7	78.6	81.0	85.0	86.0	86.0	81.4	0.345	0.347	576	6.5	440	浅黄白
自然银	83.4	87.7	89.1	91.8	93.0	93.7	94.7	95.2	93.0	0.340	0.341	576	3.7		白

① S_E —等能光谱; R_v —可见反射率; x , y —色度坐标; λ_d —主波长; P_e —颜色纯度

② 自然银的成分 (%): Ag 98.04, Cu 0.02, Fe 0.40, Sb 0.87

自然金的密度 $D=19.46 \text{ g/cm}^3$ (计算), 硬度 $H_v=65 \text{ kg/mm}^2$ (负何 50 g, 8 次平均)。银金矿的密度 $D=15.35 \text{ g/cm}^3$ (计算), 硬度 $H_v=89 \text{ kg/mm}^2$ (负何 50 g, 3 次平均)。显然, 随着矿物金含量或成色的降低, 矿物密度相应降低, 硬度却相应增高。

3.2 硫化物

硫化物种类虽多, 但含量多的只有黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂及黄铁矿四种, 它们的含量约占矿石中金属矿物总量 80% 左右。含量较少但又常见的矿物有胶黄铁矿、闪锌矿、方黄铜矿、白铁矿及方铅矿。

3.2.1 黄铜矿 含量最多的硫化物,多呈他形粒状与磁黄铁矿、黄铁矿共生,粒度约0.04~1 mm,多在0.4~0.8 mm之间。黄铜矿含有较多杂质组分(%):Zn 0.8~0.34,Co 0.0021~0.0097,Cd 0.0025~0.0037,Ag 0.0068~0.0197,Au 0.00017~0.00479。从微量元素比值可看出,黄铜矿是相对富含Ag、Zn、Co的矿物,其特征比值相应是: $Au/Ag=0.009\sim0.4$, $Zn/Pb>360$, $Co/Ni=0.91\sim>28$,黄铜矿的化学式为: $Cu_{0.9\sim0.94}Fe_{0.98\sim1.06}S_2$ (表4)。

三个黄铜矿样品的晶胞参数(由中国地质科学院矿床地质研究所林月英测试)分别是: $a_0=5.2839\text{\AA}$, $c_0=10.4107\text{\AA}$ (S-14); $a_0=5.2958\text{\AA}$, $c_0=10.4215\text{\AA}$ (S-19); $a_0=5.2892\text{\AA}$, $c_0=10.4165\text{\AA}$ 。与JCPDS、25-288号卡片的黄铜矿 ($a_0=5.2810\text{\AA}$, $c_0=10.401\text{\AA}$)^[2]比较,本矿床黄铜矿的 a_0 和 c_0 都较大,这可能与矿物含有较多杂质组分有关。

表4 黄铜矿和磁黄铁矿的化学分析

Table 4. Chemical analyses of chalcopyrite and pyrrhotite

黄铜矿		磁黄铁矿					
样号①		S-4	S-19①	S-14	N-18①	S-2	N-18
化 学 成 分 (%)	S	36.3	35.47	34.84	35.55	38.22	37.91
	Fe	30.85	31.05	32.22	31.44	61.04	61.41
	Cu	32.43	32.40	32.36	32.51		0.58
	Zn	0.19	0.24	0.18	0.34	0.26	0.0283
	Pb	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0655	<0.0283
	Co	0.0028	0.0097	0.0067	0.0021	0.058	0.0413
	Ni	<0.0001	0.0107	0.0007	0.001	0.0581	0.005
	Cd	0.0025	0.0032	0.0026	0.0037	0.0023	0.0003
	Sb	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0014	0.0011
	Mn	<0.0008	<0.0008	<0.0008	<0.0008	<0.0005	<0.0005
	Ag	0.012	0.0197	0.0068	0.0038	0.0051	<0.0001
	Au	0.00479	0.00017	0.00077	0.00057	0.0005	0.0003
	Ca	0.15	0.29	0.14	0.14	0.41	0.0048
	Mg	<0.0008	<0.0008	<0.0008	<0.0008	<0.0008	<0.0008
总计 (%)		99.94	99.50	99.76	99.99	100.12	100.00
Au/Ag		0.4	0.009	0.11	0.15	0.1	>3
Zn/Pb		>380	>480	>360	>680	4	>1
Co/Ni		>28	0.91	9.6	2.1	1	8.3
化学式		$Cu_{0.9}Fe_{0.98}S_2$	$Cu_{0.94}Fe_{1.01}S_2$	$Cu_{0.94}Fe_{1.06}S_2$	$Cu_{0.93}Fe_{1.02}S_2$	$Fe_{0.92}S$	$Fe_{0.94}S$

① 样号以“S”为代号的是南山矿段的样品,以“N”为代号的是北山矿段的样品,后表相同;

由国家地质实验测试中心谭元媛分析

黄铜矿的反射色呈典型的铜黄色,由于其视觉反射率 R_v 比自然金低得多(表3、表5),故与自然金共生时黄铜矿呈暗黄色。黄铜矿的显微硬度 $H_v=206\text{ kg/mm}^2$ (负荷50 g,5次平均)。密度 $D=4.17\sim4.19\text{ g/cm}^3$ (计算)。

3.2.2 磁黄铁矿 矿石中磁黄铁矿的含量仅次于黄铜矿。通常呈他形粒状与黄铜矿、黄铁矿共生,粒度变化在0.05~0.6 mm范围内,多在0.1~0.3 mm之间。磁黄铁矿的化学成分见表4和表6。磁黄铁矿的化学式为 $Fe_{0.85\sim0.94}S$,铁原子亏损数 $x=0.06\sim0.15$,铁(原子%) = 45.87~48.36。磁黄铁矿中还含Co、Ni、Pb、Zn、Au、Ag等微量元素。据两个

化学分析结果计算(表4),磁黄铁矿的Co/Ni、Au/Ag、Zn/Pb等比值变化较大,说明磁黄铁矿中这些元素的含量是很不稳定的。

表5 金属矿物的反射率和颜色指数

Table 5. Reflectivities and color indices of ore minerals

矿物		毒砂		磁黄铁矿		黄铜矿	方黄铜矿		黄铁矿	闪锌矿	方铅矿	自然铋	碲银矿	富硫铋铅矿	赫梯铋矿	硫碲银铋铅矿
反射率 (%)	R'_g	R'_p	R'_g	R_p	R	R'_g	R'_p	R	R	R	R	R	R	R	R	R
波长 (nm)	480	47.5	47.7	36.2	29.9	36.1	36.2	32.6	49	17.7	45.3	62.6	40.9	44	59.7	44.4
	546	54.5	52.7	34.7	43.0	45	38.2	36.4	53.6	16.8	43.3	67.6	40.5	42.4	60.8	42.3
	589	58.5	54.8	40.9	38.6	46.6	40.3	37.7	54	16.5	42.7	69	40.7	41.8	61.7	41.5
	656	56.7	55.3	46.2	36.7	47.4	42.7	38.1	55	16.3	42.4	72.1	38.1	42.9	62.7	40.9
颜色指数 (C _s)	R _v (%)	55.9	53.1	40.4	36	44.4	38.9	36.6	53.4	16.7	43.3	67.2	40.5	42.3	61.9	42.5
	x	0.356	0.348	0.363	0.359	0.369	0.350	0.354	0.348	0.324	0.326	0.345	0.334	0.324	0.339	0.325
	y	0.355	0.348	0.352	0.352	0.379	0.348	0.358	0.354	0.324	0.325	0.341	0.339	0.322	0.340	0.328
	λd (nm)	579	578	584	582	575	580	576	575	476	474	583	558	473	577	491
	P_e (%)	12.74	8.12	16.6	14.1	32.5	9.4	11.6	10.9	3.8	3.3	6.5	1.03	4.5	3.3	2.8

表6 磁黄铁矿的电子探针分析结果

Table 6. Electron microprobe analyses of pyrrhotite

样号	组分含量(%)										化学式
	S	Fe	Cu	Ag	Au	Zn	Te	As	Pb	总量	
S-7	39.99	58.99	0.21	0.09	0.46	0.02		0.52		100.28	$Fe_{0.85}S$
S-19	38.78	59.67	0.11	0.06	0.07	0.06	0.10	0.54	0.31	99.70	$Fe_{0.88}S$
N-16	39.19	59.76	0.04					1.02		100.01	$Fe_{0.88}S$

磁黄铁矿的X射线衍射分析(表7)表明,本矿床的磁黄铁矿为六方晶系,但其晶胞参数与1A1C型的普通六方磁黄铁矿明显不同,而与Buerger(1947)用磁黄铁矿单晶测定的晶胞参数($a_0=6.87\text{\AA}$, $c_0=22.7\text{\AA}$)一致^[8],属2ANC型超结构。在这种结构中,铁原子空位统计地有序排列。本矿床磁黄铁矿的N值分别为3.9388和3.9587。

显微镜下观察,磁黄铁矿的反射色为浅玫瑰棕色,非均性显著。反射率和颜色指数见表5。显微硬度 $H_v=366\text{ kg/mm}^2$ (负荷50g,3次平均)。磁黄铁矿受应力作用,常有{0001}裂开发育(照片3)。

3.2.3 毒砂 分布极普遍,常呈菱形或柱状自形晶(照片4)与黄铁矿共生,粒度变化在0.04~2.4mm之间。以前认为毒砂中Fe:As:S的比例永远是1:1:1。N Morimoto和L A Clark^[9]的研究发现,毒砂的成分是变化的,在Fe-As-S三元系中,毒砂的成分并非位于中心的一点,而是在一定的范围内变化。通常,Fe含量是固定不变的,在 33.3 ± 0.4 (原子%)范围内,而S、As变化较大。毒砂的成分应是 $FeAs_{1\pm x}S_{1\pm x}$ 。本矿床毒砂的化学成分见表8。电子探针分析结果与化学分析结果比较,S略偏低。毒砂的化学式为 $FeAs_{0.94\sim 0.98}S_{1.06\sim 1.02}$ 。

表 7 磁黄铁矿的 X 射线衍射数据
Table 7. X-ray diffraction data of pyrrhotite

矿床	样号	d (Å)	I (%)	晶胞参数 (Å)		c_0/a_0	超结构类型①
				a_0	c_0		
小西南岔 金铜矿床①	S-2	2.9719	34	6.8562	22.8451	3.3320	2ANC 型
		2.6414	42				
		2.0639	71				
		1.7177	43				
	N-18	2.9796	32	6.8937	22.9607	3.3306	2NAC 型
		2.6430	41				
		2.0652	100				
		1.7217	40				
Potosi 矿 山, 墨西哥	M19002	2.6530	60	3.4520	5.7620	1.6690	1A1C 型
		2.0740	100				
		1.7260	50				
		1.3270	40				
		1.1060	40				
		1.0520	30				

① A, C: 指最简单的红砷镍矿型基本晶胞棱长, A (a_0) $\approx 3.45\text{Å}$, c (c_0) $\approx 5.8\text{Å}$; $N=3\sim 6$, 通常为非整数;
② 由中国地质科学院矿床地质研究所林月英测试

表 8 毒砂的化学成分
Table 8. Chemical composition of arsenopyrite

样号	化学成分 (%)						化学式
	Fe	As	Au	Ag	S	总量	
S-13①	34.33	45.30	0	0.22	20.02	99.87	$\text{FeAs}_{0.98}\text{S}_{1.02}$
N-16①	34.28	45.46	0	0	20.09	99.83	$\text{FeAs}_{0.98}\text{S}_{1.02}$
S-12②	34.77	43.15	0.0026	0.0035	20.90	98.83	$\text{FeAs}_{0.98}\text{S}_{1.02}$

① 电子探针分析, 由中国地质科学院矿床地质研究所陈克樵完成;
② 化学分析由国家地质实验室测试中心朱敏完成

通常毒砂是单斜晶系。经 X 射线衍射分析, 本矿床的毒砂属三斜晶系, $a_0=5.7362\text{Å}$, $b_0=5.6787\text{Å}$, $c_0=5.7729\text{Å}$, $\beta=112^\circ 07'$ 。主要粉晶谱线: 2.6744 (91), 2.6547 (100), 2.4384 (66), 2.4069 (54), 1.8222 (39), 1.8115 (43), 1.6314 (25)。

镜下观察, 毒砂的反射色为浅黄白色, 其双反射、反射多色性、非均性等均不如普通单斜晶系毒砂明显。毒砂的反射率和颜色指数见表 5。显微硬度 $H_V=985\text{ kg/mm}^2$ (负荷 50 g, 3 次平均), 相当于摩氏硬度 6.5 左右。密度 $D=6.2\text{ g/cm}^3$ (计算)。

3.2.4 黄铁矿 金属矿物中黄铁矿的含量仅次于上述三种矿物。成矿过程中从早到晚都有黄铁矿形成。热液成矿期的黄铁矿主要有三个世代。第一世代黄铁矿与毒砂共生, 多呈他形粒状, 偶见立方体自形晶, 粒度较粗 (1~4 mm)。第二世代黄铁矿与黄铜矿、磁黄铁矿

共生,多呈立方体晶形,粒度较细(0.5~1 mm)。第三世代黄铁矿与晚期方解石共生,形成于成矿作用基本结束以后。主要晶形是立方体和五角十二面体,粒度细小(0.01~1 mm)。以上三种黄铁矿,前二者与矿化关系密切。

表 9 黄铁矿的化学分析结果

Table 9. Chemical analyses of pyrite

样号	矿物世代	化学成分 (%)			化学式
		S	Fe	总计	
S-6	黄铁矿 _I	52.82	47.07	99.89	Fe _{1.02} S
S-21	黄铁矿 _I	52.53	46.98	99.51	Fe _{1.03} S

由国家地质实验测试中心朱敏分析

黄铁矿的化学式为 Fe_{1.02~1.03}S₂(表 9)。黄铁矿_I与黄铁矿_I的微量元素特征是不同的。黄铁矿_I富含 Bi 和 As,其含量相应是黄铁矿_I的 21.7 倍和 2 倍。就 Se/Te、Ga/Ge、Co/Ni 比值而言,黄铁矿_I又比黄铁矿_I低(表 10)。可以认为,随着成矿作用的进行,成矿溶液中 Bi、Te、Ge、Au、Ni 有增高的趋势。因而,继黄铁矿-毒砂组合形成之后,在成矿中期黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿组合形成时,发生了大量 Au 的富集,在成矿作用晚期又出现了 Au 及 Ag、Bi 的碲化物组合。

黄铁矿中 Co、Ni 含量及其比值有一定成因意义。通常,沉积成因黄铁矿 Co、Ni 含量低($n \times 10^{-6} \sim n \times 10^{-5}$),Co/Ni<1。岩浆成因黄铁矿 Co、Ni 含量高($n \times 10^{-5} \sim n \times 10^{-3}$),Co/Ni<1。热液成因(斑岩型、矽卡岩型、岩浆或火山热液脉型)黄铁矿,Co、Ni 含量介于上述二者之间($n \times 10^{-5} \sim n \times 10^{-4}$),Co/Ni>1。本矿床黄铁矿中 Co、Ni 的平均含量相应为 73×10^{-6} 、 21×10^{-6} ,Co/Ni=3.4,与热液成因黄铁矿的特征一致,而与岩浆成因和沉积成因的黄铁矿有较大区别。

黄铁矿_I与黄铁矿_I的晶胞参数 a_0 相应为:5.4233Å 和 5.4225Å。主要强线相应是:2.6995 (100), 2.4168 (38), 2.2068 (29), 1.9126 (27), 1.6317 (61), 2.7062 (100), 2.4213 (42), 2.2101 (29), 1.9151 (31), 1.6337 (75)(测试者:中国地质科学院矿床地质研究所林月英)。与 JCPDS 6-0710 卡片($a_0=5.417\text{Å}$)^[2]比较,本矿床黄铁矿的晶胞参数略大,与大多数金矿床的黄铁矿特征一致,这是因为黄铁矿含有较多微量元素之故。

黄铁矿的反射色为黄色,其反射率和颜色指数见表 5。显微硬度 $H_V=1242 \text{ kg/mm}^2$ (负荷 50 g, 3 次平均)。密度 $D=4.99 \text{ g/cm}^3$ (计算)。

3.2.5 胶黄铁矿 在北山矿段较高的 620 台阶和 640 台阶分布较多,在南山矿段较少见

表 10 黄铁矿的微量元素特征

Table 10. Minor element characteristics of pyrite

矿物		黄铁矿 _I	黄铁矿 _I
样号		S-6	S-21
微量元素 (%)	AS	0.1	0.2
	Co	0.0059	0.0087
	Ni	0.00078	0.0035
	Ag	0.0238	0.0119
	Au	0.0005	0.0010
	Bi	0.001	0.0217
	Mo	0.0001	0.0002
	Ga	0.0007	0.0005
	Ge	<0.0002	0.0002
	Tl	<0.0002	<0.0002
	Se	0.0037	<0.0005
	Te	<0.0005	0.0005
In	0.0007	<0.0003	
元素比值	Au/Ag	0.021	0.084
	Se/Te	>7.4	<1
	Ga/Ge	>3.5	2.5
	Co/Ni	7.56	2.5

由国家地质实验测试中心夏月莲、谭元媛、朱敏分析

到。胶黄铁矿的含量比黄铁矿少得多，常呈具同心层的球粒与磁黄铁矿、黄铁矿共生，粒径0.2~0.7mm。球粒的同心层一般4~6层。镜下观察，胶黄铁矿已明显脱水硬化，并发生凝集结晶作用，同时产生贝壳状或波状收缩裂纹（照片5）。

黄铁矿是对硫化合物。S原子组成哑铃状的对硫 $[S_2]^{2-}$ ，其中心位于晶胞棱的中心和体中心，Fe原子占据立方体晶胞的角顶与面中心。胶黄铁矿与黄铁矿不同，它具有尖晶石型结构，部分 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 。 Fe^{2+} 充填四面体空隙， Fe^{3+} 充填八面体空隙。胶黄铁矿的分子式是 $FeFe_2S_4$ ^[5]。胶黄铁矿常富含Co，据电子探针分析（表11），本矿床的胶黄铁矿含Co 0.09%~0.48%。从矿物球粒边缘→中心，Co含量逐渐降低，而球粒中心Co又明显增高。除Co外，胶黄铁矿还含Cu、Te等微量元素，但各同心层的微量元素特征略有不同。球粒边部和中心都含Cu，过渡层不含Cu而含微量Te，这说明胶黄铁矿形成过程中，溶液的化学组分是不断变化的。

胶黄铁矿的反射色为黄色，与黄铁矿相似，但反射率却比后者低，各同心层的反射率也不相同。从边部→中心，反射率（%）依次为：34.5、31.4、33.4、34.1、35（546nm）。

3.2.6 闪锌矿和方铅矿 闪锌矿呈细粒状（0.05~0.08mm），常与磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、方铅矿共生。有时闪锌矿呈细小的星状、树枝状雏晶（0.001~0.005mm）分布于黄铜矿中。闪锌矿的电子探针分析结果（%）：S 32.11，Fe 4.22，Zn 63.3，Cu 0.30，As 0.01，总量 99.93（由中国地质科学院矿床地质研究所陈克樵分析）。化学式： $(Zn_{0.96}Fe_{0.08})_{1.04}S$ 。反射率及颜色指数见表5。显微硬度 $H_v=284\text{ kg/mm}^2$ （负荷50g）。

表 11 胶黄铁矿的电子探针分析

Table 11. Electron microprobe analyses of melnikovite

样号	N-18				
球粒同心层 (边部→中心)	1	2	3	4	5
S	52.86	52.13	52.03	52.86	52.63
Fe	46.43	47.37	47.24	47.04	46.56
Cu	0.08				0.23
Te			0.09	0.04	
Co	0.44	0.30	0.24	0.09	0.48
总量	99.81	99.80	99.60	100.03	99.90
化学式	$Fe_{1.02}S_2$	$Fe_{1.05}S_2$	$Fe_{1.04}S_2$	$Fe_{1.02}S_2$	$Fe_{1.03}S_2$

由中国地质科学院矿床地质研究所陈克樵分析

率和颜色指数见表5。

3.2.7 方黄铜矿 多呈板状晶体分布于黄铜矿中，晶体厚约0.002~0.003mm。与黄铜矿比较，方黄铜矿的反射色略带玫瑰色调，正交偏光下非均质性比黄铜矿强得多，其反射率和颜色指数见表5。经电子探针分析，方黄铜矿的化学成分（%）如下：S 33.58，Fe 41.29，Cu 24.33，Te 0.14，总量 99.97（中国地质科学院矿床地质研究所陈克樵分析）。化学式： $Cu_{1.1}Fe_{2.1}S_3$ 。

方铅矿仅在光片中偶尔见到，多呈他形细粒（0.04~0.02mm）。粒度较粗的方铅矿常出现黑色的三角形坑穴。经电子探针分析，方铅矿的化学成分（%）如下：S 13.61，Pb 86.26，Zn 0.13，As 0.05，总量 100.05（由中国地质科学院矿床地质研究所陈克樵分析）。化学式： $Pb_{0.98}S$ 。方铅矿的反射色为白色，均质性，其反射

4 矿石的结构构造

4.1 矿石构造

矿石构造以块状、细脉状、细脉浸染状为主，此外，尚有角砾状、条带状、晶洞状等构造出现。

块状构造 黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿等金属硫化物呈细粒状集合体分布于石英、方解石等脉石矿物中。硫化物含量 $>80\%$ 。块状构造多出现于矿体分支复合处，或矿体膨胀处。

细脉和细脉-浸染状构造 金属硫化物沿蚀变围岩裂隙分布，形成细脉状构造。有时含矿脉体旁侧有浸状矿化出现，形成细脉-浸染状构造。

角砾状构造 早期石英或蚀变围岩碎屑被黄铜矿、磁黄铁矿等硫化物胶结，形成角砾状构造。角砾大小不一，多变化在0.2~2 cm范围内。

条带状构造 毒砂、黄铁矿等金属硫化物集合体与石英相间排列，形成明暗相间的条带状构造。

晶洞构造 在裂隙的张开部位，黄铁矿、磁黄铁矿与石英、方解石一起，形成漂亮的晶簇，垂直洞壁生长。晶洞直径约1~1.5 cm。

4.2 矿石结构

矿石以结晶结构、交代结构为主，有时也出现出溶结构、胶状结构及压碎结构。

4.2.1 结晶结构 自形晶粒状结构，结晶力强的黄铁矿、毒砂常形成此种结构。黄铁矿多呈立方体自形晶。毒砂呈棱柱形自形晶，光片中常显菱形切面。由于溶蚀作用，矿物的晶棱、晶顶多被溶蚀而呈浑圆状，与重结晶作用形成的自形晶结构明显不同。

他形晶粒状结构 这是结晶溶液浓度较高的情况下出现的一种矿石结构。磁黄铁矿、黄铁矿多形成此种结构。在正交偏光下，可清楚地见到许多粗粒或致密块状磁黄铁矿原来是由细小的磁黄铁矿他形晶粒(0.006~0.02 mm)紧密镶嵌而成。致密块状黄铜矿或粗粒黄铜矿颗粒，经氧化或浸蚀后也可显现出他形粒状结构的特征。

填隙结构 晚生成的黄铜矿、磁黄铁矿等硫化物，常填隙于早生成的石英等脉石矿物粒间。硫化物的分布受石英等脉石矿物粒间空隙控制(照片6)。

4.2.2 出溶结构 本矿床形成出溶结构的矿物有：

主矿物	客晶矿物	分子式
闪锌矿	黄铜矿	$\text{ZnS}-\text{CuFeS}_2$
黄铜矿	闪锌矿	$\text{CuFeS}_2-\text{ZnS}$
黄铜矿	方黄铜矿	$\text{CuFeS}_2-\text{CuFe}_2\text{S}_3$
自然金	金银矿	$\text{Au}-(\text{Ag}, \text{Au})$

常见的出溶结构有以下几种：

乳浊状结构 闪锌矿中，黄铜矿呈乳滴状沿前者的一定方位析出。黄铜矿乳滴约0.002~0.003 mm，遍布于闪锌矿中。有时密集的乳滴相连，形成定向条带。乳滴结构表明，成矿温度冷却较快，出溶作用进行得不够充分。

骨晶状结构 闪锌矿呈细小的十字状、星状、针状、树枝状沿黄铜矿一定结晶方位或

其它脆弱部位析出。闪锌矿的粒度约 0.0005~0.0025 mm。

片状（板状）结构 方黄铜矿沿黄铜矿某一结晶方向析出，形成板状或片状晶体。有时金银矿沿自然金某一结晶方位析出，形成板状或片状晶体。

4.2.3 交代结构 矿石的交代结构极发育，成矿作用早期至晚期均有出现。主要的交代结构有：

交代脉状或网脉状结构 黄铜矿沿闪锌矿解理或微裂隙交代，形成不规则的细脉和网脉。大多数情况是黄铜矿或磁黄铁矿沿毒砂的微细裂隙进行交代，形成不规则的细脉或网脉（照片 7）。

交代骸晶结构 成矿溶液沿毒砂的微裂隙和孔洞钻入晶体核心进行交代，但仍保留毒砂自形晶的外壳，形成独具特色的交代骸晶结构（照片 8）。

交代残余结构 黄铜矿沿毒砂裂隙进行强烈交代，毒砂自形晶体轮廓完全消失，且成不规则的残余体残留于黄铜矿中。

交代假象结构 磁黄铁矿完全交代阳起石、透闪石等硅酸盐矿物，但仍保持被交代矿物的晶形。

4.2.4 胶体重结晶结构 胶黄铁矿呈具同心层的球状或椭球状，同心层一般 4~6 层。胶黄铁矿已明显脱水硬化，发生凝集重结晶作用，同时产生的同心状、波状收缩裂纹中常有细粒石英充填（照片 5）。

4.2.5 动力变质结构 常见的动力变质结构为压碎结构。黄铁矿及磁黄铁矿在应力作用下沿其解理、裂理或其它任意方向破碎，形成各种大小的糜棱状角砾。

表 12 矿石的金、铜含量

Table 12. Gold and copper contents of ores

元素	北山矿段		南山矿段	
	平均品位	变化范围	平均品位	变化范围
Cu (%)	0.43	0.06~6.55	0.80	0.05~3.80
Au (g/t)	3.80	0.15~45.53	3.64	0.15~45.49

据郑斗范等，1983

5 矿石的主要有用组分及银、铋的赋存状态

本矿床的金铜矿石主要是原生矿石，次生矿石意义不大。按硫化物含量的多少，原生矿石可分为少硫化物矿石和硫化物矿石两个主要类型。前者硫化物含量<15%。

矿石具脉状和细脉-浸染状构造，主要分布在北山矿段各矿体的下部，或花岗斑岩体及矿脉两侧蚀变围岩中。后者硫化物含量>15%。矿石主要为块状构造，分布于南山矿段及北山矿段各矿体的上、中部，或矿脉拐弯处及矿体分枝复合处。以下讨论的矿石主要及伴生组分特征，均是指原生矿石而言。

5.1 矿石的主要有用组分及分布特征

矿石的主要有用组分是金和铜。北山矿段和南山矿段金、铜的平均品位及变化范围见表 12。显然，矿石的金、铜品位都达到了工业要求。就铜而言，南山矿段的平均品位比北山矿段高，而金的平均品位南山、北山矿段相近。

铜基本呈独立矿物存在。主要铜矿物是黄铜矿、少量方黄铜矿、斑铜矿。只有少部分铜呈类质同象或细小包裹物的形式分散在其它硫化物、Au-Ag 系列矿物，或 Ag、Bi 碲化物中（表 13、14）。金基本上也呈独立矿物存在。主要金矿物是自然金、银金矿及金银矿。少

量金分散在各种硫化物、碲化物中（表 13、14）。与化学分析比较，电子探针分析的硫化物中金含量普遍偏高。

表 13 金属硫化物中金和铜的平均含量及变化范围（%）

Table 13. Average content and variation range of gold and copper in metallic sulfides

矿 物	Cu		Au	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值
黄铜矿	32.36~32.5	32.43 (4)	0.00017~0.00479	0.00158 (4)
磁黄铁矿	0~0.58	0.29 (2)	0.00030~0.0005	0.0004 (2)
黄铁矿			0.00050~0.00100	0.00075 (2)
毒砂			0.00260~0.00349	0.00300 (2)

括号中数字表示样品数；由国家地质实验测试中心谭元媛、夏月连、朱敏分析

表 14 金属矿物中金和铜的电子探针分析（%）

Table 14. Electron microprobe analyses of gold and copper in ore minerals

矿 物	Cu		Au	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值
黄铜矿	30.53~35.83	34.88 (5)	0~0.39	0.09 (5)
方黄铜矿	24.33	24.33 (1)		
磁黄铁矿	0.04~0.21	0.12 (3)	0~0.46	0.18 (3)
黄铁矿	0.08~0.21	0.145 (2)	0~0.01	0.005 (2)
闪锌矿	0.30	0.30 (1)		
自然金	0~0.73	0.41 (8)	81.77~99.27	90.57 (8)
银金矿	1.4	1.4 (1)	67.3	67.3 (1)
金银矿	0~0.25	0.09 (4)	30.5~46.44	38.27 (4)
碲银矿	0.49~0.56	0.53 (2)		
富硫铋铅矿	0.16	0.16 (1)	0.08	0.08 (1)
赫碲铋矿	0~0.09	0.045 (2)	0.1~0.11	0.105 (2)
自然铋	0~0.31	0.12 (6)	0~0.44	0.07 (6)
含银自然铋	1.38	1.38 (1)		
硫碲银铋铅矿	0.03~0.61	0.32 (3)	0~0.02	0.007 (3)

括号中的数字表示样品数

金、铜在空间分布上表现出一定的规律性。在研究 11 号及 24 号矿体大量分析资料的基础上，我们发现 Au-Cu 品位与成矿深度有一定关系。从图 2 可以看出，随着深度的增加，Cu 有增加的趋势。但是在矿体上部（标高 400 m 以上）铜品位比较稳定，变化不大；而在较深处（标高 400 m 以下），随着深度的加大，铜的品位却迅速增加。在垂直方向上，Au 的变化规律与 Cu 略有不同。在矿体上部（标高 400 m 以上），深度加大，Au 品位逐渐降低；但在较深处（标高 400 m 以下），Au 品位又有所增加，Au、Cu 的上述变化特征与矿物共生

组合的分布有关。早期形成的黄铁矿-毒砂组合主要分布在深部。自然金-硫化物(黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿)组合从地表至深部都有广泛分布,而且愈往深部愈有富集的趋势。已有的研究表明,黄铜矿、自然金形成于含氧量低的还原环境^[1,6],深度的增加对黄铜矿、自然金的沉淀有利。加之该矿物组合通常多叠加于富含还原剂 Fe^{2+} 的黄铁矿-毒砂组合之上,这无疑有利于黄铜矿、自然金的富集,故在较深部(标高400 m以下)Au、Cu品位都比较高。晚期形成的自然金-碲化物组合主要分布于矿体上部,通常随着深度增加,该组合含量减少。因而,在矿体上部(标高400 m以上),当铜品位大致稳定不变时,金品位反而随着深度的增加而有明显降低的趋势。据郑斗范等(1983)的资料,在深部(标高290~250 m)Au、Cu品位均显著降低,这是因为深部主要分布的是黄铁矿-毒砂组合及少量辉钼矿-黄铁矿(黄铜矿)组合,故Au、Cu品位较低。如果考虑到深部微弱的钼矿化,可以认为在垂直方向上,随着深度的增加,矿化大致有如下变化: Au—Cu—Mo。

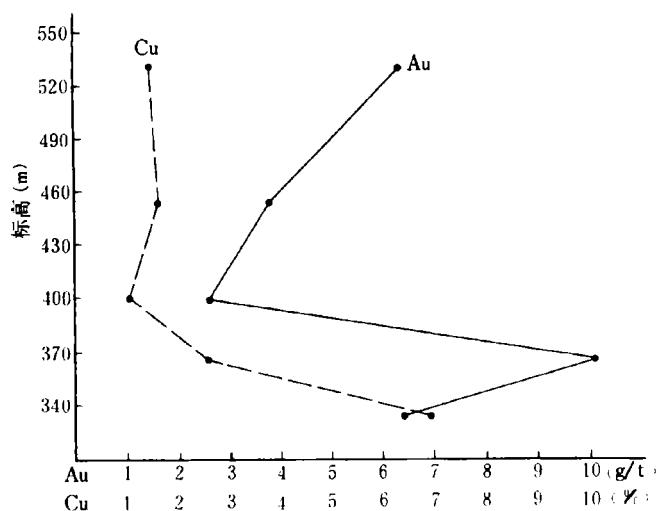


图2 11号矿体(含24号矿体)金、铜含量沿垂直方向变化曲线

Fig. 2. Vertical variation in gold and silver contents of No. 11 orebody (including No. 24 orebody).

沿矿体走向和厚度, Au、Cu品位变化亦有一定规律。北山矿段1~2号主矿体,其厚度及Au、Cu品位均由南向北递增,最富地段位于北端2线以北564 m标高附近。南山矿段11号体为本区最大矿体, Cu品位较高,多大于1%,沿走向和倾向变化不大,但是Au则分布不均匀。Au、Cu品位在矿体南、北两侧相对较低,均在中段(19~20线)出现峰值(图3)。

5.2 金和铜的相关关系

根据矿石多元素化学分析结果(郑斗范等, 1983),对Bi、As、Mo、Ag、Cu、Au进行族群分析,其结果表明Au、Cu关

系比较密切(表15)。从元素分群图(图4)可看出,在相关系数-0.2~-0.3的水平上可将元素分为两群,一群为Mo、As、Bi,为成矿的伴生元素,另一群为Au、Cu,系成矿的主元素。此外,在对南山矿段(11号脉及24号脉)五个中段Au、Cu两元素进行的相关分析,包括了约600个样品的统计,也说明Au、Cu两元素比较接近,它们的相关系数为0.3~0.6。因此可以认为,矿石中Au、Cu的关系比较密切,往往黄铜矿等硫化物富集的地方, Au也比较富集,这大概是因为Au与Cu都属同族元素,它们有某些类似的物理化学性质所致。

5.3 银和铋的赋存状态

矿石伴生的有益组分有Ag、Te、Mo、Bi、Ga、Ge、Re、In等,其中以Ag、Bi含量较

高, Bi 0.01%~0.02%, 平均值 0.013%; Ag 6.82~33 g/t, 平均值 16.5 g/t (表 16)。矿石中 Mo 含量极低。南山矿段 6 个组合样品的化学分析, Mo 含量为零, 只是在北山矿段两个选矿实验样品中, Mo 相应为 0.004% 和 0.012%。这与矿物研究结果一致。我们对南山矿段各中段光薄片的详细观察并未发现辉钼矿, 而辉钼矿仅少量出现于北山矿段隐伏斑岩体蚀变带中。Kesler (1973) 研究斑岩铜矿中 Au、Cu、Mo 的关系时指出, 斑岩铜矿可以分为从地质上讲真正的斑岩铜-钼矿和斑岩铜-金矿两类, 它们可能代表成分根本不同的矿化系统。显然, 本矿床属于后者。

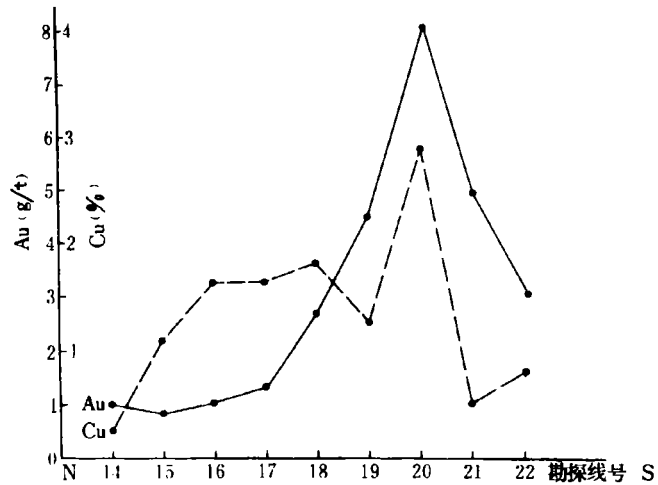


图 3 11 号矿体金、铜含量沿走向变化曲线
Fig. 3. Variation in gold and silver contents along strike of No. 11 orebody.

表 15 矿石的主元素及微量元素的相关矩阵

Table 15. Correlation matrix of main and minor elements in the ores

	Bi	Mo	As	Ag	Cu	Au
Bi	1.0000					
Mo	-0.2640	1.0000				
As	-0.3576	0.9104	1.0000			
Ag	-0.5377	0.3878	0.1048	1.0000		
Cu	-0.2992	-0.5436	-0.4316	0.0165	1.0000	
Au	-0.9981	-0.0914	-0.0398	0.0597	0.3502	1.0000

矿石的 Au/Ag 比值常是人们关注的焦点。R W Boyle (1979)^[7]对各种类型矿床 Au/Ag 比值的研究发现, 只有三种类型的深成矿床 Au/Ag 比值 > 1, 它们是含金石英脉岩矿床, 某些矽卡岩矿床, 大多数前寒武纪、古生代、中生代岩石中的含金石英脉。斑岩铜矿中 Au/Ag 比值一般都比较低。有关资料报导^[7], 不列颠哥伦比亚省斑岩铜矿的 Au/Ag 比值变化很大。温哥华岛上“铜岛”矿床的 Au/Ag 比值接近 0.2。其它矿床, 例如格兰尼斯尔、伯利恒等, 其 Au/Ag 比值为 0.002~0.095。麦金太尔铜钼矿体中 Au/Ag 比值约 0.14。本矿床 Au/Ag 比值变化在 0.08~0.92 之间, 大多在 0.08~0.43 范围内, 平均值 0.30 (表 16), 比“铜岛”和麦金太尔的 Au/Ag 比值高些, 但比其它矿床的 Au/Ag 比值都高得多, 这也许是由于金铜斑岩矿床矿化系统 (有成因关系的侵入岩及其热液相) 的原始成分差异造成的。

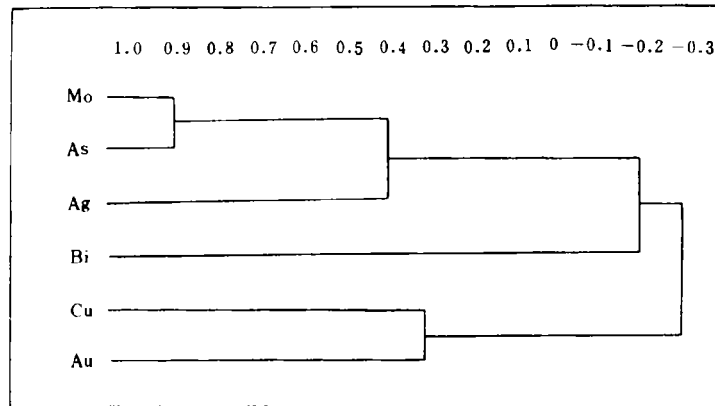


图 4 矿石的元素地球化学谱系

Fig. 4. Geochemical lineage of elements in ores.

表 16 矿石中金银铋的化学分析

Table 16. Chemical analyses of gold, silver and bismuth in ores

矿段	南山 (组合样)						北山 (选矿样)	平均值
样号	Ⅱ-1	Ⅱ-2	Ⅱ-3	Ⅱ-4	Ⅱ-5	Ⅱ-6	选矿-1	
Bi (%)	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01		0.01
Ag (g/t)	17.50	11.00	16.00	33.00	14.50	16.80	6.82	16.52
Au (g/t)	3.28	1.35	3.26	14.21	5.55	1.27	6.25	5.02
Au/Ag	0.19	0.12	0.20	0.43	0.38	0.08	0.92	0.30

分析数据来自郑斗范等, 1983

至于 Ag 和 Bi 的赋存状态, 经大量光薄片观察及矿物的化学、电子探针分析查明, 除少量 Ag、Bi 呈类质同象存在于硫化物中外 (表 4、6、8、10), 大部分是呈独立矿物产出。因此, 在冶炼矿石中的 Au、Cu 时, 可考虑对 Ag、Bi 的综合利用。

主要的银、铋矿物及特征如下:

(1) 银矿物 除前面已叙述过的金银矿外, 目前查明的银矿物还有碲银矿和硫碲银铋铅矿。

碲银矿 常呈他形粒状 (0.01~0.05 mm), 与自然金、自然铋及银、铋碲化物共生。电子探针分析结果表明, 碲银矿中常含 Cu、Zn、Au、Sb、Pb、Fe 等杂质元素。据表 17 的化学成分平均值, 本矿床碲银矿的化学式为: $(\text{Ag}_{2.06}\text{Cu}_{0.03}\text{Zn}_{0.01})_{2.1}\text{Te}_{1.0}$, 简化为 Ag_2Te 。镜下观察, 碲银矿呈灰白色微带蓝色色调, 其反射率和颜色指数见表 5。由于矿物粒度细小, 正交偏光下观察, 矿物的非均性不十分明显。

硫碲银铋铅矿 这是在这次工作中首次发现的, 遗憾的是由于矿物粒度太细, 无法做 X 射线粉晶分析, 矿物名称暂以成分定名。硫碲银铋铅矿常与自然铋、自然金、碲银矿共生, 有时与自然铋一起呈浸染状分布于黄铜矿粒间。硫碲银铋铅矿多呈他形粒状, 粒度约 0.002~0.02 mm。反射色为浅灰白色微带蓝色色调, 它的颜色指数很好地反映了矿物的这一特点

(表5)。据矿物化学成分平均值(表17)计算该矿物的化学式为: $(\text{Ag}_{2.2}\text{Pb}_{1.7}\text{Bi}_{1.18})_{5.08}(\text{Te}_2\text{S}_{2.9})_{4.9}$, 简化为 $(\text{Ag}, \text{Pb}, \text{Bi})_5(\text{Te}_2\text{S}_3)_5$ 。从三个电子探针分析结果看出, S和Te含量比较稳定, Ag、Pb、Bi含量变化较大, 特别是Pb和Bi含量变化最大。但是, Ag、Pb、Bi这三个元素的总量却是稳定的。据三个电子探针分析结果, 它们分别为: 70.9%、70.10%、69.96%。因此, 电子探针的分析结果是可信的, Ag、Bi、Pb含量的变化是由于类质同象置换的缘故。

表 17 银、铋矿物的电子探针分析 (%)

Table 17. Electron microprobe analyses of silver and bismuth minerals (in percentage)

矿物名称	样号	组分含量											
		S	Te	As	Sb	Ag	Fe	Cu	Zn	Au	Bi	Pb	总量
碲银矿	S-19 (2) C		35.95			61.91	0.17	0.56	0.40				98.99
	S-14A (B)		36.71			62.72		0.49					99.92
	平均值		36.32			62.32	0.08	0.53	0.20				99.45
硫碲银铋铅矿	S-19 (2) C	7.36	20.93			18.32	0.1	0.03	0.07		3.32	49.26	99.39
	S-7 (1) A	8.43	21.44		0.13	23.00	0.35	0.61	0.06		22.29	24.81	101.12
	S-7 (1) A	7.54	21.78		0.24	18.46	0.12	0.32	0.09	0.02	36.52	14.98	100.07
富硫铋铅矿	平均值	7.78	21.38			19.93	0.19	0.32	0.07	0.007	20.71	29.68	100.07
	砂-E	14.81					0.15	0.16		0.08	20.42	64.81	100.43
赫碲铋矿	S-14A (A)	0.50	19.39	0.21	0.35	0.08	0.09		0.10	0.10	78.33		99.15
	S-14A (A)	0.45	19.2	0.16	0.13	0.07	0.06	0.09	0.11	0.11	78.22	0.44	99.04
	平均值	0.48	19.3	0.19	0.24	0.075	0.075	0.045	0.105	0.105	78.28	0.22	99.12
自然铋	S-7 (1) A	0.05		0.59	0.37	0.20	0.13	0.31	0.11	0.44	96.91	0.44	99.55
	S-14A (B)					0.05		0.22			99.39		99.66
	N-18 (1) A		0.03			0.05					99.87		99.95
	N-16 (3) A						0.59				99.00		99.59
	N-16 (3) A					0.16	0.59	0.17			98.98		99.90
	N-16 (3) B					0.60	0.20				98.80		99.60
	平均值	0.008	0.005	0.1	0.06	0.18	0.25	0.12	0.02	0.07	98.83		99.64
含银自然铋	N-16 (3) A					8.35	0.91	1.38			89.26		99.90

由中国地质科学院矿床地质研究所陈克樵分析

(2) 铋矿物 这次工作中发现三种铋矿物: 自然铋、富硫铋铅矿、赫碲铋矿。

自然铋 分布最广的铋矿物, 常与自然金、碲银矿、赫碲铋矿、硫碲银铋铅矿等共生, 多呈他形粒状分布于黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂粒间或裂隙中, 粒度约 0.01~0.12 mm。镜下自然铋呈亮乳白色, 在空气中很快变成红乳色或棕色, 颜色指数和反射率见表5。经电子探针分析, 自然铋中 Bi= 96.91%~99.00%, 常含 S、Fe、Cu、Ag 等微量元素。Ag 含量有时高达 8.35%, 形成含银自然铋(表17)。

富硫铋铅矿 又称赫鲁夫斯基矿, 属斜方辉铅矿族, 是比较少见的硫盐矿物, 多呈他形粒状(0.002~0.02 mm)与自然金及铋、银矿物共生。反射色为白色微带蓝色色调, 与自然金连生在一起时呈蓝灰色。反射率比碲银矿稍高, 颜色指数与碲银矿也有较大差异(表5)。富硫铋铅矿具有强非均质性。据电子探针分析结果计算, 矿物的化学式为: $\text{Pb}_{6.09}\text{Bi}_{2.01}\text{S}_9$, 简化后为 $\text{Pb}_6\text{Bi}_2\text{S}_9$, 或 $6\text{PbS} \cdot \text{Bi}_2\text{S}_3$ 。除主要组分 Pb、Bi 外, 富硫铋铅矿中还含微量 Fe、Cu、Au 等(表17)。

赫碲铋矿(hedleyite) 比较少见的矿物, 1945年由H V Warren和M A Peacock首次发现^[14]。本矿床的赫碲铋矿呈他形粒状(0.01~0.03 mm), 与自然金、自然铋、碲银矿共生。矿物的反射色为白色, 双反射微弱, 非均性强, 反射率(%)和颜色指数与大厂矿田拉磨铜锌矿床的赫碲铋矿($R_{480}=58.1$, $R_{540}=61$, $R_{580}=61.7$, $R_{660}=62.4$; $x=0.3411$, $y=0.3426$, $R_v=61.4\%$, $\lambda_d=576\text{ nm}$, $P_v=5.1\%$)一致^①。与共生的碲银矿比较, 其反射率明显较高(表5)。

赫碲铋矿的理论成分(%)是: Bi 79.26, Te 20.74。加拿大产出的赫碲铋矿(%): Bi 80.60, 81.55; Te 18.52, 17.60; S 0.12, 0.04^[14]。广西拉磨铜锌矿床赫碲铋矿^②的化学成分(%): Bi 79.31, Te 17.96, Se 1.78, Sb 0.14, Pb 0.66, Ag 0.003, Ni 0.02, Cu 0.01, Zn 0.02。电子探针分析结果, 本矿床赫碲铋矿的Bi、Te含量与理论值均接近。个别样品由于Ag等元素的类质同象置换, Bi含量比较低。与拉磨铜锌矿床的赫碲铋矿一样, 本矿床的赫碲铋矿常含多种杂质组分(表17), 据化学成分平均值计算, 化学式为 $(\text{Bi}_{6.86}\text{As}_{0.05}\text{Sb}_{0.04})_{6.95}(\text{Te}_{2.73}\text{S}_{0.27})_3$ 。

6 成矿阶段及矿物共生组合

野外观察及大量光薄片研究表明, 矿石的形成经历了以下五个主要成矿阶段, 即: 黑云母(少硫化物)阶段、石英-绢云母-黄铁矿-毒砂阶段、石英-方解石-自然金-黄铜矿阶段、方解石-石英-自然金-碲化物阶段、方解石(碳酸盐)阶段。

6.1 黑云母(少硫化物)阶段

随着斑岩岩浆的侵位, 成矿热流体($t>500^\circ\text{C}$)大量聚集在斑岩体顶部及附近围岩中。温度逐渐降低, 成矿流体与花岗斑岩、硅酸盐围岩发生反应, 在斑岩内部产生钾硅酸盐蚀变(黑云母化及钾长石化); 在铝硅酸盐围岩中产生黑云母角岩、长英质角岩等。此阶段晚期伴有少量黄铁矿、辉钼矿等金属硫化物。它们呈细脉浸染状分布于北山矿段西侧隐伏花岗斑岩体的蚀变带中。由于硫化物含量极少, 未形成工业矿体。

6.2 石英-绢云母-黄铁矿-毒砂阶段

由于热流体的上升和地下水的加入, 围岩中的钾长石、斜长石等一系列硅酸盐矿物变得不稳定, 产生绢云母化和硅化, 同时成矿流体的盐度也增高。随着温度、压力的降低, SO_2 发生水解, 形成大量 H_2S , 从而促使许多金属硫化物从流体中沉淀出来。

本阶段形成的金属硫化物种类不多, 典型的共生组合是黄铁矿-毒砂, 这是Fe-As-S三元系中最重要矿物组合。黄铁矿是贯通性矿物, 各成矿阶段都有生成。本阶段形成的黄铁矿为他形, 中粗粒(1~3 mm), 以较高的Se/Te、Ga/Ge、Co/Ni比值及较低的Au/Ag比值为特征(表10)。毒砂呈菱形或柱状自形晶。与毒砂和黄铁矿共生的脉石矿物主要是石英, 次为绢云母。

毒砂是普通硫化物中最稳定的矿物之一。当毒砂在形成过程中被硫缓冲时, 它的As/S比值是形成温度的函数, 故利用毒砂的化学成分, 可以求得黄铁矿-毒砂的平衡温度^[10]。毒砂各组分的原子%是根据表8的分析结果计算的。无论是电子探针或化学分析, 三个样品的Fe含量变化都不大, 均在 33.3 ± 0.4 原子百分数范围内(表18), 说明分析数据准确, 符

① 李锡林, 1989, 大厂矿田首次发现赫碲铋矿和碲银矿, 矿物岩石地球化学通讯, 第4期, 250~252

合作地质温度计的要求。利用毒砂的成分,在 U Kretschmar & S D Scott (1976) 实验得出的黄铁矿-毒砂平衡曲线上求得平衡温度为 390~475℃ (表 18、图 5)。另外,根据样品 S-12 的 X 射线粉晶分析测得毒砂的 d_{131} 值为 1.6314。利用 Clark (1960)^[12] 的毒砂 d_{131} 值与形成温度关系图求得毒砂的平衡温度约 390℃ (图 6),与用化学分析方法求得的温度一致。从 Fe-As-S 体系的温度-成分图 (图 5) 中可看出,与黄铁矿共生的毒砂生成温度在 363~491℃ 之间,毒砂的成分富硫 ($\text{FeAs}_{0.9}\text{S}_{1.1}$)。用化学分析、电子探针分析及 X 射线粉晶分析结果求得的平衡温度与 Kretschmar 等 (1976) 的研究相吻合,只是由于电子探针分析采用的标准不太合适,测出的 As (原子%) 偏高,其平衡温度也比用其它两种方法求得的温度高些。用热台测得与黄铁矿、毒砂共生的石英的均一温度是 340~500℃,与平衡温度基本一致。可以认为,本阶段的成矿温度为 340~500℃,而毒砂、黄铁矿等金属硫化物在 390~475℃ 范围内形成。

表 18 毒砂中各组分的原子百分比及平衡温度
Table 18. Atom percentage of Fe-As-S in arsenopyrite and its equilibrium temperatures

序号	样号	原子百分数			平衡温度 (℃)
		As	Fe	S	
1	S-13	32.75	33.42	33.83	470
2	N-16	32.85	33.23	33.92	475
3 ^①	S-12	31.12	33.65	35.23	390

① 为化学分析,其余为电子探针分析

毒砂在形成过程中由于硫逸度的变化而出现 As/S 比值的变化。已知毒砂的形成温度,利用 Borton (1969) 的 Fe-As-S 体系中毒砂的硫化反应平衡图解,求得黄铁矿-毒砂平衡时的硫逸度 $\lg f_{\text{S}_2} = -5 \sim -7$ 。

毒砂和黄铁矿中含微量 Au (表 8、10)。在黄铁矿-毒砂组合发育的地方,金矿物也比较富集。但是,详细的显微镜观察发现,金矿物基本上是与黄铜矿、磁黄铁矿、碲化物一起,沿裂隙分布于毒

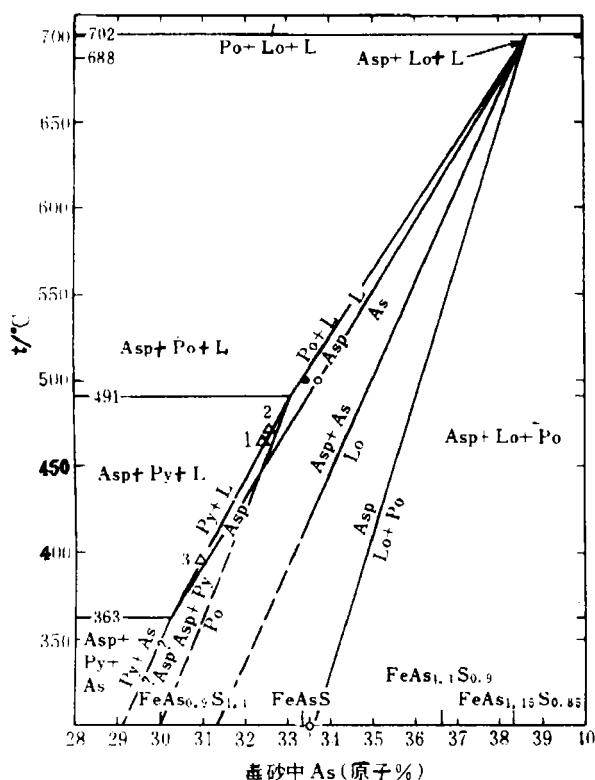
砂中的,二者是不同阶段的产物。显然,本阶段无明显的金矿化,大量金矿物的形成比黄铁矿-毒砂组合晚。许多金矿床的研究表明,金矿物多在中-低温热液条件下形成,然而本矿床黄铁矿-毒砂组合的生成温度较高,不利于金的富集。但是,本阶段常为后期金的富集提供有利条件。由于毒砂、黄铁矿性脆、裂隙多,可为金的富集提供有利的空间;加之,已形成的硫化物,特别是象毒砂、黄铁矿等富 Fe^{2+} 的硫化物,常可作为金的沉淀剂,促使金发生富集。

6.3 石英-方解石-自然金-黄铜矿阶段

随着成矿作用的进行,成矿流体中地下水的比重加大。热流体与围岩的作用除继续产生绢云母化和硅化外,还由于温度、压力等物理化学条件的变化,促使大量碳酸盐、硫化物及自然金的沉淀。同时,围岩中的铁镁硅酸盐矿物发生分解,形成大量绿泥石和石英。

本阶段形成的硫化物种类较多,典型的共生组合是黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿。这是 Cu-Fe-S 体系中最重要矿物组合。本阶段形成的黄铁矿为细粒,多呈立方体,富含 Au、Ag、Bi 等微量元素,与早期黄铁矿 (黄铁矿-毒砂组合) 有明显区别。除黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿这三种主要 Fe-Cu 硫化物外,还见少量方黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、胶黄铁矿等硫化物。

本阶段后期有大量金矿物形成,它们主要是自然金,少量银金矿。前者的成色为 872~993,平均成色 940;后者成色为 673。它们多呈不规则的细小颗粒分布于硫化物粒间或裂

图 5 含毒砂缓冲曲线的 $T-X$ 图(据 Kretschmar 和 Scott, 1976)^[10]

Asp—毒砂；Lo—斜方砷铁矿；Py—黄铁矿；Po—磁黄铁矿；
As—自然砷；L—液相

图中三角形为本矿床的毒砂，编号同表 18

Fig. 5. $T-X$ diagram with arsenopyrite-buffered curves(after Kretschman and Scott, 1976)^[10]

Asp—Arsenopyrite; Lo—Loellingite; Py—Pyrite;
Po—Pyrrhotite; As—Native arsenic; L—Liquid phase.
Triangles stand for arsenopyrite in the ore deposit, with
serial number as for Table 18.

隙中 (照片 1, 2)。

与上述金属矿物共生的脉石矿物主要有方解石、石英、绿泥石及绢云母。它们与金属矿物一起呈细脉穿插于早期阶段生成的矿物组合中，形成常见的细脉状、网脉状构造 (照片 7)。

由于大量有经济价值的黄铜矿、自然金都形成于此阶段，其矿物组合分布又极为广泛，故在整个成矿过程中，本阶段是最重要的成矿阶段。

成矿实验表明：黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿共生组合的平衡温度低于 350°C ，只有在这温度以下才有这个稳定的组合。另外，前面已述及在黄铜矿中有时能见到方黄铜矿的板状出溶体。据 Schwartz (1927) 的研究，黄铜矿-方黄铜矿的出溶温度 $>250^{\circ}\text{C}$ 。看来，本阶段的成矿温度应在 $250\sim 350^{\circ}\text{C}$ 之间，属高—中温度热液范围。这一结论与石英的均一温度 ($220\sim 360^{\circ}\text{C}$) 基本一致。黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物的爆裂温度为 $210\sim 280^{\circ}\text{C}$ (中国地质科学院矿床地质研究所陈伟十测定)，基本在上述温度范围内。虽然均一温度和成矿实验提供的平衡温度或出溶温度，成矿温度上限是 360°C 或

350°C ，但是大多数金属矿物可能是在 $210\sim 280^{\circ}\text{C}$ 的中温热液条件下形成的。

当磁黄铁矿与黄铁矿共生时，它的成分与温度和硫逸度有关。若已知磁黄铁矿的成分和温度，可采用 Toulmin 和 Barton (1964)^[12] 提出的公式计算硫逸度：

$$\lg f_{\text{S}_2} = (70.03 - 85.83X_{\text{FeS}}) \left(\frac{1000}{T} - 1 \right) + 39.30 \sqrt{1 - 0.998X_{\text{FeS}}} - 11.91$$

式中， X_{FeS} 为磁黄铁矿中 FeS 克分子率，即 $X_{\text{FeS}} = \text{Fe} / (\text{FeS} + \text{S}_2)$ 。当成矿温度在 $210\sim 350^{\circ}\text{C}$ 时， $\lg f_{\text{S}_2} = -6.1 \sim -13.9$ 。

6.4 方解石-石英-自然金-碲化物阶段

成矿流体继续沿围岩裂隙活动。由于地下水的大量加入,成矿流体往往以地下水占优势。此时热流体的温度比较低,产生的蚀变作用主要是碳酸盐化及硅化,并伴随 Au、Ag、Bi 矿化。

本阶段主要形成 Au-Ag-Bi 矿物组合,伴有少量晚期细粒黄铜矿、黄铁矿等硫化物,与其共生的脉石矿物主要是细粒石英和方解石。Au-Ag 系列有自然金和金银矿。自然金的成色为 820~868,平均成色 852,比石英-方解石-自然金-黄铜矿阶段的自然金的成色低得多。金银矿的平均成色 382。银、铋矿物中,除单质矿物自然铋、含银自然铋,硫盐矿物富硫铋铅矿外,基本上是银铋碲化物,如碲银矿、赫碲铋矿、硫碲银铋矿等。由于 Ag 与 Te 的亲合力比 Au 强,故该组合中未出现碲金矿。自然金、金银矿、自然铋及各种碲化物多呈不规则的细粒状集合体分布于早期晶出的矿物粒间,或沿这些矿物裂隙分布,穿插早期矿物组合。可见,本阶段的特点是出现了银、铋矿化,且金又发生了第二次富集。金的第一次富集与铜、铁等硫化物有密切关系,而它的第二次富集则主要与银、铋碲化物及其硫盐矿物有关,共生的硫化物不多。

本阶段的成矿温度在 160~240℃ 之间(石英的均一温度)。黄铜矿的爆裂温度是 160~180℃。矿物是在中—低温热液条件下形成的。

在 Au-Ag-S 体系中,当金银矿与辉银矿平衡时,金银矿的脱色与温度和硫逸度有关。若已知 Au-Ag 系列矿物的成分和温度,就可按 Barton 和 Toulmin (1964)^[13]提出的下列表达式计算硫逸度:

$$\lg f_{S_2} = \frac{1}{4.576T} \{ -41980 + 16.52T - 18.296T \lg X_{Ag} + 4(1 - X_{Ag})^2 [5650 - 1600(1 - X_{Ag}) - 1.375T] \}$$

式中 X_{Ag} 为 Ag 原子比率。经计算,当温度在 160~240℃ 时,自然金-金银矿与辉银矿平衡时的硫逸度 $\lg f_{S_2} = -9.3 \sim -16.7$ 。但是矿物组合中未发现辉银矿,自然金、金银矿是与银、铋碲化物及少量黄铜矿、黄铁矿等硫化物共生的,故上述硫逸度计算值与实际情况可能有一定偏差。

6.5 方解石(碳酸盐)阶段

成矿作用已基本结束,热流体几乎都是地下水,温度低于 160℃。本阶段未发生矿化,

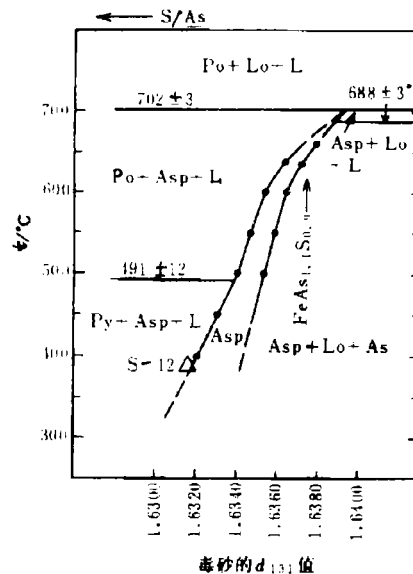


图 6 毒砂的 d_{131} 值与形成温度的关系
(据 L A Clark, 1960)^[11]

图中三角形点为本矿床毒砂(S-12)在图上的投影

Fig. 6. Relationship between d_{131} and formation temperature of arsenopyrite
(after L A Clark, 1960)^[11].

Triangles represent projections of arsenopyrite from the deposit on the diagram.

主要形成晚期方解石脉。这些方解石脉遍布全区,且穿切上述各阶段形成的矿物共生组合。在方解石脉中有少量晚期的黄铁矿分布。

7 结 语

(1) 小西南岔矿床是一个以金、铜为主,并伴有银、铋矿化等多种金属的斑岩矿床。在北山矿段西侧隐伏花岗斑岩体蚀变带中出现有微弱的钼矿化,但实际意义不大。

(2) 矿石的矿物成分比较复杂。典型的金属硫化物是黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿。毒砂含量较多,这与大多数斑岩铜矿不大相同,说明成矿作用早期,溶液中As的浓度是比较高的。金矿物是以金-银系列中的自然金、银金矿、金银矿为主。银、铋矿物中,除自然铋和少量硫盐外,多为碲化物。

(3) 成矿作用过程中,从早→晚形成的典型金属矿物共生组合是:黄铁矿-毒砂,自然金-黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿,自然金-银铋碲化物。矿物共生组合的变化表明,矿石的形成经历了由Fe-As-S体系到Au-Cu-Fe-S, Au-Ag-Bi-Te体系的演化。

(4) 金与铜有较密切的相关关系,因此有类似的富集特征,这主要表现在它们都明显富集于成矿中期的石英-方解石-自然金-黄铜矿阶段,通常铜富集的地方,金往往也有富集的趋势。但是,金、铜矿化也有差异。铜矿化从早期黑云母(少硫化物)阶段开始,在石英-方解石-自然金-黄铜矿阶段达到最大富集。金的最大富集虽然也出现在石英-方解石-自然金-黄铜矿阶段,但它还延续到晚期的方解石-石英-自然金-碲化物阶段,出现了金的第二次富集。银、铋矿化仅出现于成矿作用的晚期。

(5) 金、铜矿体产于绿泥石化、绢云母化、硅化、碳酸盐化蚀变围岩中。微弱的钼矿化出现于隐伏的花岗斑岩蚀变带中。空间分布上,从上至下矿化大致有如下变化: Au (Ag, Bi) → Cu (Au) → Mo。

(6) 矿石形成温度主要在160~500℃范围内。矿石形成过程中,随着温度的降低,硫逸度也有降低的趋势。石英-绢云母-黄铁矿-毒砂,石英-方解石-自然金-黄铜矿,方解石-石英-自然金-碲化物等三个主要成矿阶段的温度和硫逸度相应是: 340~500℃, $\lg f_{S_2} = -5 \sim -7$; 210~350℃, $\lg f_{S_2} = -6.1 \sim -13.9$; 160~240℃, $\lg f_{S_2} = -9.3 \sim -16.7$ 。

参 考 文 献

- 1 朱训,黄崇柯,芮宗瑶等. 德兴斑岩铜矿. 北京:地质出版社,1983
- 2 姜胜章,罗仕徽等. 湖南金属矿物. 长沙:中南工业出版社,1992
- 3 陈殿芬,孙淑琼. 吉林海沟金矿床自然金的矿物学特征. 地质论评, 1992, 38 (5): 469~472
- 4 米赫耶夫 B N. 矿物伦琴射线鉴定手册. 周延坤,梁容珍译. 北京:地质出版社,1957
- 5 王濮,潘兆麟,翁玲宝. 系统矿物学(上册),地质出版社,1982
- 6 栾世伟等. 金矿床地质及找矿方法. 成都:四川科技出版社,1987
- 7 博伊尔 R W. 金的地球化学及金矿床. 马万钧等译. 北京:地质出版社,1984
- 8 Berry L B, Rhompson R M. X-ray powder data for ore minerals. New York: The Geological Society of America, 1962
- 9 Morimoto N, Clark L A. Arsenopyrite crystal-chemical relation. The American Mineralogist, 1961, 46 (11 and 12): 1448~1470
- 10 Kretschmar U, Scott S D. Phase relation involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. The Canadian Mineralogist, 1976, 14 (3): 364~386
- 11 Clark L A. The Fe-As-S system: phase relation and application. Pt. I. Econ. Geol., 1960, 55 (8): 1631~1652

- 12 Toulmin P, Barton P B. A thermodynamic study of pyrite and pyrrhotite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28 (5): 641~671
- 13 Barton P B, Toulmin P. The electrom-tarnish method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28 (5): 619~640
- 14 Власов К. А. Геохимия, Минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. Том 2: Минералогия редких элементов. Москва: "Наука", 1964

照片说明

- 1 银金矿 (Elt) 分布于磁黄铁矿 (Po) 粒间, 旁边的脉石矿物为石英 (Q), 北山矿段, 反光 $\times 500$
- 2 自然金 (Au) 分布于磁黄铁矿 (Po) 和黄铜矿 (Cp) 粒间, 旁边的脉石矿物为石英 (Q), 北山矿段, 反光 $\times 500$
- 3 磁黄铁矿 (Po) 受应力作用, 常有 {0001} 裂开发育, 南山矿段, 反光 $\times 100$
- 4 毒砂 (Asp) 的自形晶, 旁边为石英 (Q) 及黄铜矿 (Cp), 南山矿段, 反光 $\times 100$
- 5 胶黄铁矿 (Me) 呈具同心层的球粒与黄铁矿 (Py)、磁黄铁矿 (Po) 共生, 北山矿段, 反光 $\times 100$
- 6 金属硫化物 (Su) 充填于早生成的石英 (Q) 粒间, 南山矿段, 反光 $\times 100$
- 7 黄铜矿、磁黄铁矿等硫化物 (Su) 沿毒砂 (Asp) 裂隙进行交代, 形成交代网脉状结构, 南山矿段, 反光 $\times 100$
- 8 黄铜矿 (Cp) 沿毒砂 (Asp) 微裂隙和孔洞钻入晶体核心进行交代, 但仍保留毒砂自形晶的外形, 南山矿段, 反光 $\times 100$

ORE MINERALS AND CHARACTERISTICS OF ORES IN THE XIAOXINANCHA GOLD-COPPER DEPOSIT, JILIN PROVINCE

Chen Dianfen and Zhou Wenmao

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 10037)

Key words: gold-copper deposit, ore mineral, mineral association, Xiaoxinancha of Jilin

Abstract

As a porphyry deposit related to Yanshanian granite porphyry, the Xiaoxinancha gold-copper deposit is dominated by gold and copper, associated with silver, bismuth as well as weak molybdenum mineralization. Gold-copper (silver-bismuth) orebodies occur in chloritized, sericitized, silicified and carbonatized altered wall rocks; weak molybdenum mineralization exists in the concealed granite porphyry alteration zone. Spatially, mineralizations vary approximately in downward succession of gold (silver, bismuth) $\rightarrow$ copper (gold) $\rightarrow$ molybdenum.

Ore minerals are rather complex, with the typical metallic sulfides being pyrite, arsenopyrite, pyrrhotite and chalcopyrite. Ores contain fairly abundant arsenopyrite, which is different from character of most porphyry copper deposits, suggesting arsenic concentration of the solution was pretty high at the early ore-forming stage. Gold minerals are native gold, electrum and kustelite of gold-silver series, and the fineness of gold is in the range of 305~993. Besides

native bismuth and minor sulfosalt-heyrovskyite, the silver and bismuth minerals are mainly such tellurides as hessite and hedleyite. The gangue minerals include quartz, calcite, chlorite and sericite.

In the ore-forming process, the typical associations of ore minerals formed from early to late are in order of pyrite-arsenopyrite, native gold-pyrite-pyrrhotite-chalcopryrite, and native gold-tellurides of silver and bismuth, suggesting that the formation of ores underwent variation from Fe-As-S to Au-Cu-Fe-S and Au-Ag-Bi-Te systems.

Statistics of 600 samples show the existence of certain correlation between gold and copper, with the correlation coefficient being 0.3~0.6. Therefore, gold and copper commonly exhibit similar enrichment characteristics, as mainly finds expression in the fact that they are both obviously concentrated at the quartz-calcite-native gold-chalcopryrite stage of the middle ore-forming phase, and gold tends to be concentrated wherever copper is rich. In spite of this, there exist some differences between gold mineralization and copper mineralization: copper mineralization started at the early biotite (less sulfides) stage, and attained the highest enrichment at the quartz-calcite-native gold-chalcopryrite stage. In contrast, although the highest gold enrichment occurred at the quartz-calcite-native gold-chalcopryrite stage, it continued to the late calcite-quartz-native gold-telluride stage, causing for the second time the enrichment of gold. Silver-bismuth mineralization merely occurred at the late ore-forming stage, namely calcite-quartz-native gold-telluride stage.

Ores were formed at 500~160°C and under 4.5~74 MPa. During the formation of ores, sulfur fugacity tended to decrease with the drop in temperature. There are three major ore-forming stages, namely quartz-sericite-pyrite-arsenopyrite, quartz-calcite-native gold-chalcopryrite, and calcite-quartz-native gold-tellurides, and the temperature and sulfur fugacity ($\lg f_{S_2}$) of these three stages are 500~340°C and -5~-7, 350~210°C and -6.1~-13.9, and 240~160°C and -9.3~-16.7 respectively.

国际地质对比项目 (IGCP 354) —— “岩石圈金属 超巨量工业堆积” 已获国际地质对比计划立项

Economic Superaccumulations of Metals in Lithosphere (IGCP 354)
Approved by IGCP Scientific Board in February 1995

国际地质对比计划科学委员会第 23 届理事会于 1995 年 1 月 30 日至 2 月 3 日在法国巴黎举行, 理事会在世界各国提交的 18 个科研项目中严格筛选出包括 IGCP 354 在内的 8 个为新设立的项目。IGCP 354 项目的首席科学家为国际矿床成因协会主席、中国地质学会矿床专业委员会主任裴荣富研究员, 项目其它负责人有: P Laznicka (加拿大), D V Rundquist (俄罗斯), J Kutina (美国), I P Plimer (澳大利亚) 和 Takeo Sato (日本), 项