

混合岩化作用中交代岩和铁矿形成的实验研究*

梁祥济**

(中国地质科学院地质研究所, 北京)

提 要: 通过黑龙江西麻山、天宝山和河南桐柏山混合岩化交代铁矿床的野外地质工作, 并进行了高温高压下系统的模拟实验。实验结果证明了在 $380\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度和 $300\times 10^5\sim 700\times 10^5\text{ Pa}$ 的压力下, 含 K、Na 卤化物的弱酸性混合岩化的热液, 与太古代的变质岩经历了 120 个小时的持续交代作用, 形成了与这些矿区基本相一致的交代岩和铁矿, 揭示了混合岩化作用中形成了交代岩和铁矿的物理化学条件。

主题词: 实验研究 混合岩化作用 交代岩和铁矿 物理化学条件

交代作用在自然界中普遍存在。在地幔或地表条件下, 在岩浆侵入、火山活动、变质和混合岩化过程中, 都伴随着不同程度的交代作用, 形成了各式各样的交代岩和与其有关的铁矿床。作者曾经通过实验证明了岩浆侵入接触, 火山气热液作用于火山岩和沉积变质岩系中都能形成了交代岩及其铁矿床^[1-10]。现在又进行了混合岩化作用产生交代岩和铁矿的模拟实验。

我们选择了较典型、工作程度较高的黑龙江西麻山、天宝山和河南桐柏山混合岩化交代型铁矿床作为研究对象。在这些矿床野外地质工作的基础上, 进行了高温高压下系统的模拟实验。实验的结果与野外实际相吻合。这不仅揭示了混合岩化交代铁矿床形成的机理, 而且又一次打破了“矽卡岩只能在中酸性侵入岩与碳酸盐岩地层相接触产生”的传统观念^[12]。从而, 进一步地证明了交代岩和其铁矿是多成因。这不但充实和提高了交代成矿的理论, 而且对于找矿亦有指导意义。

1 矿区主要的地质特征

西麻山和天宝山铁矿床位于吉黑地槽褶皱系东西向构造体系内, 桐柏山铁矿床隶属于秦岭地槽褶皱系秦岭东西向构造带。它们的共同矿床地质特征(图 1、2、3)概述为: (1) 矿床出露与成矿有关的地层是太古代区域变质岩。西麻山和天宝山矿区出露的为麻山群, 桐柏山

* 本文为地质行业基金资助项目的一部分成果

** 曲国林、乔莉和王福生参加了部分工作

梁祥济, 男, 55岁, 副研究员, 1964年毕业于北京地质学院。长期从事成岩成矿实验研究。邮政编码: 100027
1992-3-17收稿, 1992-7-23修改回

矿区的变质岩主要是桐柏群。它们的主要岩性是变粒岩、麻粒岩、片麻岩、片岩、透辉石岩、角闪岩和大理岩等；(2)矿区内老变质岩普遍遭受了混合岩化作用，形成了混合岩化角闪斜长变粒岩、花岗质混合片麻岩、片麻状混合岩、条带状、眼球状混合岩和均质混合岩等。在暗色变质岩经混合岩化，普遍析出铁，显然，这为铁矿形成提供铁质所留下的佐证(表1)；(3)矿区的混合岩化作用，导致围岩发生了矽卡岩化或形成了矽卡岩，如石榴透辉斜长麻粒岩、石榴斜长片麻岩和矽卡岩化角闪片岩等。磁铁矿矿体呈似层状、层状赋存在透辉石岩和角闪岩内。石榴石矽卡岩、透辉石石榴石矽卡岩、透闪石石榴石矽卡岩和含绿帘石透辉石石榴石矽卡岩是铁矿体的直接围岩。局部地段还出现了钙镁橄榄石、硅镁石和斜硅镁石的镁矽卡岩。

综上所述，我们有根据地推测：在太古代西麻山、天宝山和桐柏山地区处于浅海环境，铁第一次富集在含铁的白云质泥灰岩等沉积岩中，后经区域变质作用形成了含铁透辉石岩、角闪岩、麻粒岩、变粒岩和片麻岩。这些岩石再度遭受强烈的混合岩化，伴随着交代作用，导致了矽卡岩的形成，使之铁从上述岩石中被交代出来，二次富集成矿。

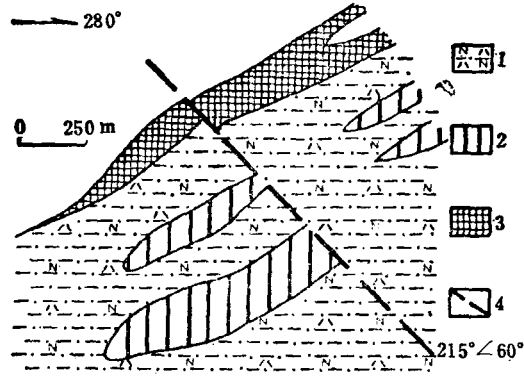


图1 西麻山铁矿床采坑平面图
(据黑龙江矿产地质第一调查研究所资料, 1980)
1—混合岩化角闪斜长变粒岩; 2—暗色麻粒岩; 3—磁铁矿体; 4—推测断层及其产状

Fig. 1. Plan view of the mining pit in the Ximashan iron deposit.
1—Migmatized amphibole-plagioclase leptynite; 2—Dark granulite; 3—Magnetite orebody; 4—Inferred fault and its attitude.

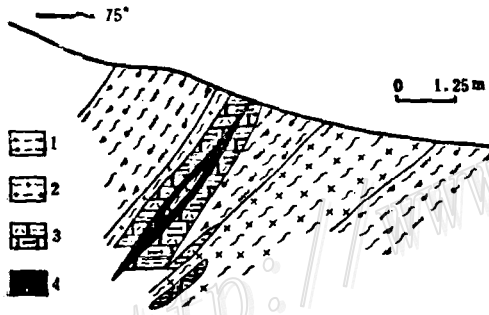


图2 天宝山矿区第三勘探线剖面素描图
(据黑龙江第七地质队资料修改, 1981)

1—条带状、条痕状和眼球状混合岩; 2—花岗岩质混合片麻岩、混合花岗岩、均质混合岩; 3—近矿围岩、角闪岩、透辉石岩、矽卡岩化片岩; 4—磁铁矿体
Fig. 2. Geological section along No. 3 exploration line of the Tianbaoshan ore district.
1—Banded, streaked and augen migmatite; 2—Granitic migmatitic gneiss, migmatitic granite and isotropic migmatite; 3—Near-ore wall rocks, amphibolite, diopsidite, skarnized schist; 4—Magnetite orebody.

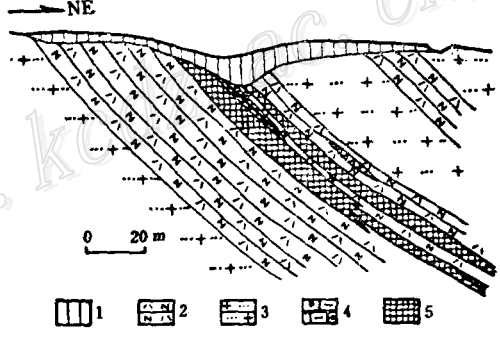


图3 桐柏山罗棚矿区102勘探线剖面
(据河南省地质局地质研究所铁组资料, 1979)

1—黄土; 2—斜长角闪片岩; 3—变粒岩; 4—绿泥石石榴石矽卡岩; 5—磁铁矿体
Fig. 3. Geological section of No. 102 exploration line of the Luopeng (Tongboshan) ore district.
1—Loess; 2—Plagioclase-amphibole schist; 3—Leptynite; 4—Chlorite-garnet skarn; 5—Magnetite orebody.

表 1 西麻山、桐柏山矿区在混合岩化和交代过程中岩石主要化学成分的变化
Table 1. Variation in major chemical composition of rocks in Ximashan and Tongboshan ore districts with migmatization and metasomatism

矿区名称	岩石名称	主要化学成分 (%)								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TFe
西麻山 矿区 ^①	暗色麻粒岩	49.20	7.29	2.12	5.03	10.26	23.30	0.18	0.36	7.70
	混合岩	71.90	14.07	0.07	1.38	0.55	1.38	6.88	1.85	1.60
桐柏山 矿区 ^②	斜长角闪片岩	49.48	15.52	3.60	7.37	5.53	9.82	0.80	3.61	11.79
	片麻状混合岩	74.94	12.63	2.21	0.62	0.46	0.91	1.03	5.78	2.90

① 根据盛中方、王兴华 (1979) 和梁祥济 (1981) 的资料;

② 根据河南地质局地质科学研究所 (1980) 资料

2 实验技术和方法

实验样品采用天然西麻山花岗岩化片麻岩和天宝山的含磁铁矿透辉石角闪斜长麻粒岩。前者主要由斜长石 (45%)、石英 (40%)、石榴石 (10%) 和角闪石 (5%) 组成, 后者主要矿物成分是斜长石 ($An=55$) (50%)、绿色角闪石 (30%)、透辉石 (10%)、石榴石 (5%) 和磁铁矿 (5%)。它们的岩石化学成分分别列于表 2。这两种岩石样品与桐柏山变质岩和混

表 2 实验样品的化学成分 (%)
Table 2. Chemical composition of experimental samples

样品号	采样地点	样品名称	化 学 成 分							总量		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO			
西 C ₁₀	西麻山矿区	花岗岩化片麻岩	71.90	14.07	0.10	0.07	1.38	1.38	0.55			
I ₁ b ₁₇ da	天宝山矿区	磁铁矿透辉角闪 斜长麻粒岩	41.54	14.23	0.82	5.93	12.12	12.59	7.70			
样品号	化 学 成 分											
	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	CuO	ZnO	CO ₂	F	Cl	SO ₃	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	总量
西 C ₁₀	6.88	1.85	0.03	0.40	0.15	0.09	0.076	0.03	0	0.46	0.04	99.46
I ₁ b ₁₇ da	1.06	0.96	0.23	0.25	0.15	0	0.67	0.05	0.05	1.06	0.20	99.61

注: 由中国地质科学院测试技术研究所杨桂芳等 (1981) 测试

合岩化后的岩石很相似, 它们的矿区地质特征相同, 故实验结果完全能代表桐柏山交代岩和铁矿形成的物理化学条件。

反应溶液是根据西麻山暗色麻粒岩和桐柏山斜长角闪片岩变为混合岩的化学成分变化特征和条件实验结果而配制的。西麻山实验的反应介质为 $\text{pH}=6.5$ 的, 并含一定量的 CaO 、 MgO 和 Fe_2O_3 的 $0.4\text{MNaCl}+0.4\text{MNaF}+0.2\text{MKF}$ 的水溶液。天宝山实验介质是 $\text{pH}=4.5$ 的 $0.4\text{MNaCl}+0.4\text{MNaF}+0.2\text{MKF}$ 水溶液。

实验中氧逸度依赖于实验样品中 Fe_2O_3 和 FeO 自行反应来调节。如天宝山样品中 $\text{Fe}_2\text{O}_3=5.93\%$, $\text{FeO}=12.12\%$, 足够控制它们的氧化-还原环境。西麻山样品中含有 1.38% 的 FeO , 但 Fe_2O_3 的含量太低 (0.07%)。通过条件实验证明必须加入一定量的 Fe_2O_3 来控制氧逸度, 才能促使交代岩的形成。

实验在冷封自紧式高压釜和快速高压高温实验装置中进行。实验样品焊封在含有反应溶液的金、银试管中, 置于高压釜反应腔内。实验温度为 $350\sim 650^\circ\text{C}$, 由精密自动控温仪控制, 误差 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。实验压力 $250\times 10^5\sim 700\times 10^5\text{Pa}$, 根据 G C 肯尼迪 $P-T-V$ 填充度计算^[11]。实验持续时间为 120 小时。实验样品在十万分之一天秤上称重, 固体样品为 $100\sim 120\text{mg}$ 。反应溶液的 pH 值用精密试纸测定。

反应结果的固相产物用显微镜油浸法和 X 光相互配合鉴定。萃取铁的实验液相产物送做特征元素的化学分析。

实验结果的 P 、 T 图的绘制是以矿物共生组合为基础的, 而划分共生组合的原则是根据特征的主要矿物相进行。特征矿物则又是在一定的温度、压力范围内都出现的矿物相。

3 实验结果和讨论

混合岩化交代的实验分两条途径进行: 一是用矿区的天然变质岩作为实验试料; 二是根据矿区变质岩的岩石化学成分, 用化学试剂配制试料。它们在不同的温度和压力下分别与不同的反应溶液相互作用, 结果形成了与矿区相似的交代岩和铁矿: (1) 在 $350\sim 650^\circ\text{C}$ 的温度和 $300\times 10^5\sim 700\times 10^5\text{Pa}$ 的压力下, 以天然西麻山花岗岩化片麻岩 (60mg) + CaO (20mg) + MgO (20mg) + Fe_2O_3 (20mg) 作试料和 $\text{pH}=6.5$ 的 $0.4\text{MNaCl}+0.4\text{MNaF}+0.2\text{MKF}$ 水溶液, 经受了 120 个小时的相互交代作用, 其结果列于表 3, 作图 4; (2) 在 $350\sim 650^\circ\text{C}$ 的温度和 $300\times 10^5\sim 700\times 10^5\text{Pa}$ 的压力下, 根据天宝山含磁铁矿透辉角闪斜长麻粒岩的岩石化学成分 (见表 2), 用化学纯和光谱纯的化学试剂配制试料和 $\text{pH}=4.5$ 的 $0.4\text{MNaCl}+0.4\text{MNaF}+0.2\text{MKF}$ 的水溶液, 持续了 120 个小时的相互交代作用, 其结果反映在表 4 和图 5 上。

现将上述实验的结果进行分析和讨论:

3.1 混合岩化交代实验形成的特征矿物

在 $350\sim 650^\circ\text{C}$ 的温度和 $300\times 10^5\sim 700\times 10^5\text{Pa}$ 压力下的混合岩化交代作用实验过程中出现了钙铁榴石、钙铝榴石、透辉石、钙铁辉石、硅灰石、透闪石、磁铁矿、硅镁石、斜硅镁石、钙镁橄榄石、橄榄石、金云母、符山石、方柱石、萤石、石英、方解石、钙霞石和绿帘石等二十多种特征交代矿物和蚀变矿物。由于文章篇幅受限, 它们的显微镜下光学特征和 X 光鉴定资料只好从略, 仅将主要的特征交代矿物的显微油浸照片附上 (见照片 1~6), 作为

表3 西麻山矿区在不同温度和压力下混合岩化作用交代实验的结果
Table 3. Data on metasomatic experiments of migmatization in the Ximashan ore district at different temperatures and pressures

实验号 (No)	实验温度 (°C)	实验压力 (10 ⁷ Pa)	实验后 (pH)	新形成的固相产物 ^①
645	350	500	10.0	试料基本不变
656	350	575	7.0	试料基本不变
649	350	600	10.0	Wo, Flr, Andr
646	350	700	11.0	Wo, Andr
662	400	500	12.0	Wo, Mt, Andr, Cal
659	400	650	8.0	Mt, Wo, Andr-Gro, Flr
665	420	650	7.5	Andr-Gro, Tre, Di, Mt, Hu-Chu, Phl, Wo
647	450	300	10.0	试料遭受蚀变, 但未出现新矿物
650	450	400	10.0	试料遭受蚀变, 但未出现新矿物
654	450	450	9.0	Wo, Andr
642	450	500	10.0	Andr, Mt, Di, Tre, Hu-Chu, Wo, Phl
643	450	700	11.0	Wo, Andr-Gro, Mt, Di, Tre, Phl, Hu-Chu
666	480	700	7.2	Andr-Gro, Di-Hed, Tre, Mt, Hu-Chu, Phl
651	500	350	10.0	试料遭受蚀变, 但未出现新矿物
667	500	375	7.5	Andr, Wo, Can
668	500	420	7.5	Andr-Gro, Wo, Can
652	500	600	10.5	Di, Andr, Mt, Flr, Tre, Wo, Phl, Hu-Chu
661	500	700		Andr-Gro, Flr, Tre, Mt, Di, Phl, Wo
664	520	500	11.0	Andr-Gro, Wo, Tre, Di, Mt, Hu-Chu
655	550	350	10.0	Mt, Cal, Wo, Andr
658	550	400	8.0	Andr, Mt, Wo, Flr, Hu-Chu, Phl, Di
641	550	500	8.5	Di-Hed Mt, Wo, Tre, Andr, Hu-Chu, Phl, Mot
672	570	500	7.8	Andr, Wo, Mt, Di, Tre, Flr,
683	580	400	7.0	Andr-Gro, Wo, Hu-Chu, Mt, Phl, Di
670	600	280	7.5	试料基本不变
648	600	300	11.0	Andr, Wo, Mt
669	600	350	7.5	Andr-Gro, Wo, Mt, Can
667	600	380	7.0	Andr, Wo, Mt, Flr, Can
657	600	400	8.0	Andr, Wo, Mt, Hed, Phl, Flr
663	600	450	11.0	Andr-Gro, Mt, Wo, Sc, Tre
660	600	600	8.0	Andr-Gro, Wo, Mt, Tre, Di
644	650	500	11.0	Mt, Di, Tre, Wo, Andr-Gro, Phl, Mot

① 表中该栏内, 矿物相对含量, 前者为多, 依次递减, 后者最少。后文诸表同此
矿物名称符号: Andr—钙铁榴石; Cal—方解石; Can—钙霞石; Chu—斜硅镁石; Di—透辉石; Flr—萤石;
Gro—钙铝榴石; Hed—钙铁辉石; Hu—硅镁石; Mot—钙镁橄榄石; Mt—磁铁矿; Ol—橄榄石; Phl—金云母; Qz—
石英; Sc方柱石; Tre—透闪石; Vl—符山石; Wo—硅灰石(后文同此)

表4 天宝山矿区在不同温度和压力下混合岩化作用交代实验的结果
Table 4. Data on metasomatic experiments of migmatization in
the Tianbaoshan ore district at different temperatures and pressures

实验号 (No)	实验温度 (°C)	实验压力 (10 ⁵ Pa)	实验后 (pH)	新形成的固相产物
590	350	500	6.0	试料遭受蚀变,但未出现新矿物
597	350	700	8.0	试料遭受蚀变,但未出现新矿物
606	375	600	7.5	试料遭受蚀变,但未出现新矿物
678	380	700	7.5	Andr, Hed, Wo
604	400	400	6.5	试料基本不变
608	400	475	7.5	试料遭受蚀变,但未出现新矿物
609	400	500	9.0	Wo, Di, Hed
600	400	600	6.5	Flr, Wo, Di, Andr
675	430	500	7.0	Wo, Andr, Mt, Flr, Di
676	430	700	7.5	Wo, Di, Tre, Andr-Gro, Sc (?)
598	450	300	7.0	试料遭受蚀变,但未出现新矿物
607	450	350	6.0	试料遭受蚀变,但未出现新矿物
601	450	400	6.5	Di, Tre, Wo, Mot, Andr
593	450	500	6.5	Tre, Hed, Mt, Andr, Ol, Qz, Flr, Hu Chu
594	450	700	6.5	Tre, Mt, Andr, Ol, Di, Hu-Chu
679	460	430	5.5	Tre, Hed, Ol, Andr, Mt, Hu-Chu
605	500	300	8.0	未形成新矿物
602	500	350	6.5	Mt, Wo, Andr
684	500	380	5.5	Hu-Chu, Andr-Gro, Wo, Mt, Phl, Tre
603	500	600	6.5	Hed, Di, Andr, Tre, Mt, Hu-Chu
680	500	700	6.5	Andr-Gro, Hed, Tre, Ol, Mt, Flr
681	525	600	5.5	Hed, Tre, Ol, Mt, Andr-Gro, Flr, Vl
592	550	500	6.5	Andr-Gro, Di, Tre, Ol, Hu-Chu, Flr
673	600	275	6.5	未形成新矿物
599	600	300	8.0	Mt, Andr, Wo
685	600	330	5.8	Wo, Andr-Gro, Tre, Flr, Mt
679	600	350	5.5	Di-Hed, Hu-Chu, Ol, Mt, Tre, Andr
682	650	330	6.5	Andr-Gro, Di-Hed, Ol, Mt, Tre, Flr
595	650	500	7.0	Andr, Mt, Hed, Ol, Qz, Tre

它们的代表。

3.2 混合岩化交代实验形成的矿物共生组合

图4表明了西麻山片麻岩混合岩化作用形成了交代岩和铁矿的物理化学条件。根据实验所形成的典型特征矿物随温度和压力变化的特点,划分出三个矿物共生组合:

- I. Wo + Andr-Gro^① + Mt + Flr + Cal + Can;
- II. Hu-Chu + Andr-Gro + Wo + Phl + Mt + Di - Hed + Tre + Mot;
- III. Andr-Gro + Wo + Mt + Di - Hed + Tre + Phl + Flr + Sc

① 底下加横线的矿物表示该组矿物的特征矿物。后文同此

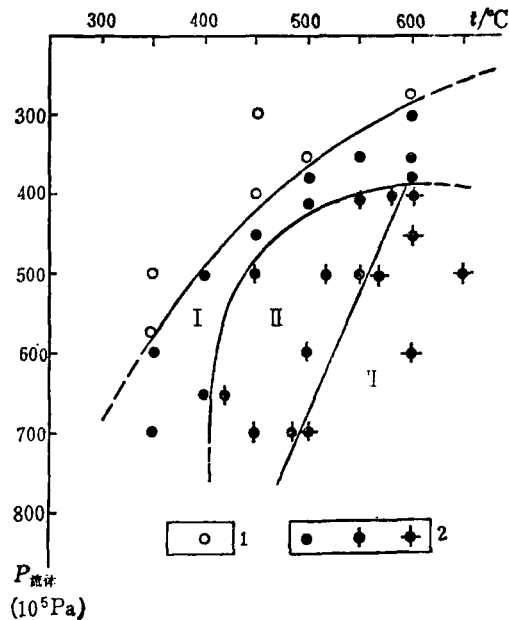


图4 西麻山片麻岩混合岩化交代作用实验所形成交代岩和铁矿的P-T图

1—未形成矿物；2—形成了新矿物

Fig. 4. P-T diagram of metasomatite and iron ore formed during experimentation on migmatization and metasomatism of Ximashan gneiss.

1—With no new minerals formed; 2—With new minerals formed.

I—Wo + Andr - Gro + Mt + Flr + Cal + Can;

II—Hu - Chu + Andr - Gro + Wo + Phl + Mt + Di - Hed + Tre + Mot;

III—Andr - Gro + Wo + Mt + Di - Hed + Tre + Phl + Flr + Sc

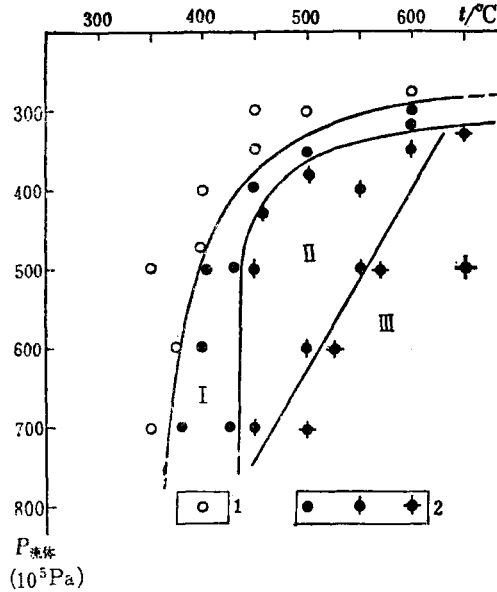


图5 天宝山混合岩化交代作用实验所形成的交代岩和铁矿的P-T图

1—未形成矿物；2—新形成矿物

Fig. 5. P-T diagram of metasomatite and iron ore formed during experimentation on migmatization and metasomatism of Tianbaoshan ore district.

1—With no new minerals formed; 2—With new minerals formed.

I—Wo + Andr - Gro + Di - Hed + Tre + Mt + Flr + Mot;

II—Hu - Chu + Di - Hed + Andr - Gro + Tre + Mt + Ol + Wo + Qz + Flr + Phl;

III—Andr - Gro + Di - Hed + Tre + Ol + Mt + Flr + Vl + Qz

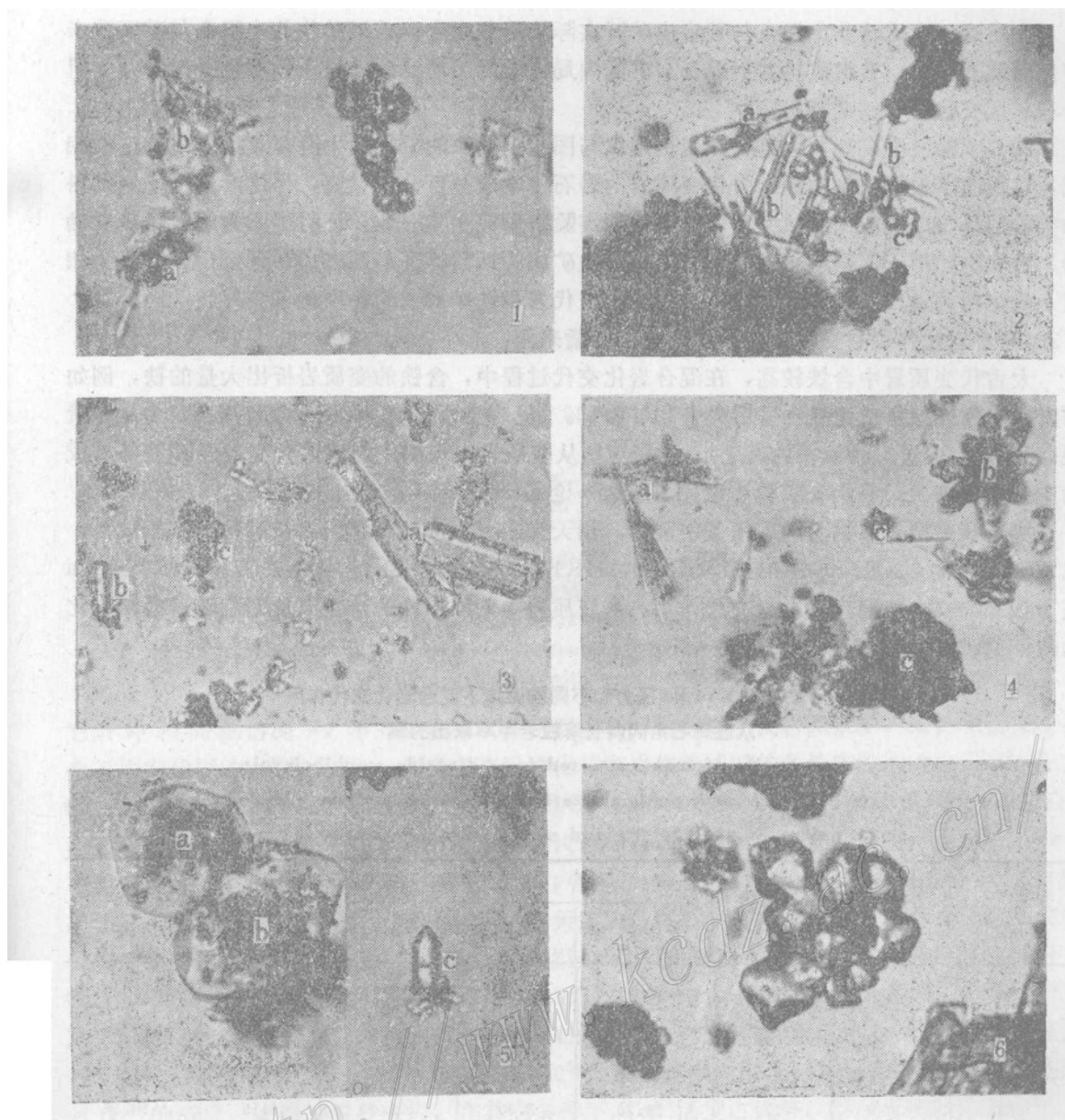
上述三组矿物共生组合与西麻山实际情况相符。I组矿物组合相当于矿区内变质岩经混合岩化作用的同时伴随着产生矽卡岩化的围岩，例如矽卡岩化角闪片岩、石榴石透辉石化片麻岩等。II组为镁矽卡岩的矿物组合，在一定的温度和压力范围内形成了与矿区中局部出现的硅镁石、钙镁橄榄石矽卡岩相一致。III组为钙矽卡岩与矿区主体的交代岩和铁矿相当，该矽卡岩有的是矿体的直接围岩，当其中磁铁矿含量多，TFe达到工业品位时，本身就成了矿体。

图5反映了天宝山交代岩和铁矿形成的物理化学条件。根据实验形成的典型特征矿物随温度和压力变化的特征，归纳于三个矿物共生组合：

I. Wo + Andr - Gro + Di - Hed + Tre + Mt + Flr + Mot;

II. Hu - Chu + Di - Hed + Andr - Gro + Tre + Mt + Ol + Wo + Qz + Flr + Phl;

III. Andr - Gro + Di - Hed + Tre + Ol + Mt + Flr + Vl + Qz



图版说明

- 照片1 钙铁榴石(a)、硅灰石(b)，黑龙江西麻山实验产物 油浸 单偏光· $\times 960$
- 照片2 透辉石(a)、钙铁辉石(b)、钙铁榴石(浑圆状)(c)，黑龙江天宝山实验产物 油浸 单偏光 $\times 960$
- 照片3 透辉石(a)、钙铁辉石(b)和钙铁榴石(c)，黑龙江西麻山实验产物 油浸 单偏光 $\times 300$
- 照片4 透闪石(a)、石英(b)、磁铁矿(c)，黑龙江天宝山实验产物 油浸 单偏光 $\times 685$
- 照片5 硅镁石(a)、斜硅镁石(b)和钙镁橄榄石(c)，黑龙江西麻山实验产物 油浸 单偏光 $\times 1200$
- 照片6 萤石集合体，黑龙江天宝山实验产物 油浸 单偏光 $\times 1200$

上述这三组矿物共生组合与天宝山矿区实际情况相吻合：I组矿物共生组合与矿区矽卡岩化变质岩相当；II组矿物共生组合与矿区内局部地段出现镁矽卡岩一致；III组矿物共生组合与矿区交代岩和铁矿相对应。

图5上的三个矿物共生组合和变化规律与图4上反映的矿物共生组合及其变化特征很相似，这说明了根据天宝山矽卡岩化变质岩的岩石化学成分百分含量值，用化学试剂配制试料的实验结果与以西麻山天然变质岩作试料的实验结果完全相一致，证明了实验的数据是准确的、可靠的。由于河南桐柏山混合岩化交代铁矿床的地质特征与西麻山和天宝山矿区极为相似，故这两种途径实验的结果亦适合桐柏山交代岩和铁矿形成的物理化学条件。

3.3 混合岩化作用中交代岩和铁矿形成的铁质来源

太古代变质岩中含铁较高，在混合岩化交代过程中，含铁的变质岩析出大量的铁，例如西麻山暗色麻粒岩变成混合岩后失去TFe 6.1%（见表1），桐柏山斜长角闪片岩变为片麻状混合岩析出TFe 8.89%（见表1）。无疑这些从变质岩中析出来的铁成为交代岩和铁矿形成的主要铁质来源。我们在实验中也证明了这一论点。

实验在带金、银衬套的高压釜中进行。用天宝山天然透辉石角闪斜长麻粒岩作为试料，以pH=4.5的0.4MNaCl+0.4MNaF+0.2MKF水溶液作为混合岩化的热液，在 500×10^5 Pa压力和350~550℃温度下进行交代作用，从变质岩中萃取出铁的含量以及它们随着温度变化的特征见表5和图6。

表5 在 500×10^5 Pa压力和不同的温度下混合岩化交代作用
从透辉石角闪斜长麻粒岩中萃取出的量

Table 5. Quantity of iron extracted from diopside-amphibole-plagioclase granulite during migmatization and metasomatism under the pressure of 500×10^5 Pa and at different temperatures

实验号 (No)	实验温度 (°C)	实验后 (pH)	从岩石中萃取出铁的量 (mg/l)				
			FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (总)	FeO/Fe ₂ O ₃	TFe
863	350	7.0	10.80	3.00	15.00	3.60	10.49
857	400	6.5	10.80	6.00	15.00	3.60	10.49
858	450	6.5	12.59	2.00	16.00	6.30	11.19
859	500	7.0	20.70	5.00	23.00	4.15	19.58
860	550	6.5	224.95	0.00	250.00		174.86

从表5和图6可以看出，从天宝山变质岩中萃取出铁随着温度升高而增加，同时进一步证实了混合岩化过程中从变质岩中交代出铁，再度富集成矿。这就清楚地表明了变质岩中的铁是交代岩和铁矿形成的铁质来源。

3.4 混合岩化交代岩和铁矿形成的物理化学条件

决定和影响交代岩和铁矿形成的主要因素有物质成分和钙、镁的活度，反应溶液和pH、温度、压力和氧化还原环境等，它们既互相促进，又互相抑制。

34.1. 物质成分，钙、镁活度和氧逸度 物质组分是形成交代岩和铁矿的决定因素，在其

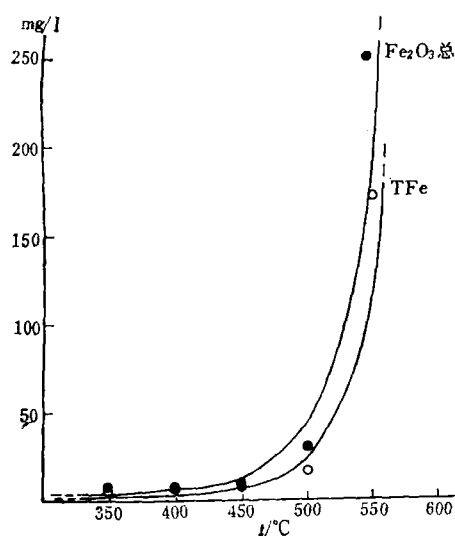


图 6 从天宝山矿区透辉角闪斜长麻粒岩中萃取出 Fe_2O_3 (总) 和 TFe 的量随温度变化图

Fig. 6. Variation in quantity of total Fe_2O_3 and TFe extracted from diopside-amphibole-plagioclase granulite of the Tianbaoshan ore district with temperature.

它条件相同的情况下,不同的物质成分将形成不同特征的交代岩和铁矿。而钙和镁又决定着不同交代岩的类型。例如,西麻山花岗岩化片麻岩作为试料的条件实验中,由于该岩中 Ca、Mg 和 Fe 含量太低 ($\text{CaO}=1.38\%$, $\text{MgO}=0.55\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=0.07\%$, $\text{FeO}=1.38\%$),在适宜的温度和压力等条件下,未能形成交代岩和铁矿。经过反复试验证明,只有在 60 mg 花岗岩化片麻岩中加入 CaO、MgO 和 Fe_2O_3 各 20 mg,才能形成与矿区相似的交代岩和铁矿。在同样适宜的温度和压力等条件下,按天宝山透辉石角闪斜长麻粒岩化学成分,用化学试剂配制的试料,不需附加 Ca、Mg、Fe 等组分就能形成交代岩和铁矿,这是因为该试料中 $\text{CaO}=12.59\%$ 、 $\text{MgO}=7.7\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3=5.93\%$ 、 $\text{FeO}=12.12\%$ 之故。显然是其中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的活度起了重要的作用。同样,在西麻山和天宝山交代岩的铁矿形成的 P - T 图中硅镁石、斜硅镁石等只能在 $450\sim 600^\circ\text{C}$ 和 $400\times 10^5\text{Pa}$ 以上范围内出现,这是由于 Mg^{2+} 的活度超过 Ca^{2+} 的活度,才形成镁矽卡岩,在其它条件下, Ca^{2+} 活度占优势,形成了钙矽卡岩。

氧逸度是实验中形成交代岩和铁矿的不可缺少的因素。这次实验又证明了这一点。在西麻山条件实验中,由于花岗岩化片麻岩内 Fe_2O_3 很低,仅只 0.07% ,无法控制氧逸度,故未形成交代岩和铁矿,只有加入 20mg Fe_2O_3 时,才取得了实验成功的结果。这说明了原样品中加入 Fe_2O_3 它不仅为交代岩和铁矿形成时提供了铁,而更重要的是它和原样品中的 FeO 一起起了控制了氧化还原环境。天宝山实验样品中 $\text{Fe}_2\text{O}_3=5.93\%$ 、 $\text{FeO}=12.12\%$,本身自动起了氧逸度的控制作用。实验产物中都出现了磁铁矿,说明了交代岩和铁矿是在弱氧化环境中形成,这与我们以往的实验结果相一致。

3.4.2 反应溶液和它的 pH 值 在具备物质成分、温度、压力和氧逸度的条件下,能否形成交代岩和铁矿则决定于反应溶液和它的 pH 值。通过条件实验,只有模拟配制 $0.4\text{MNaCl}+$

0.4MNaF + 0.2MKF 的水溶液作为变质混合岩化的热液最为合适。然而由于这种热液 pH 不同, 导致实验产物也不相同。pH = 6.5 的这种热液适合于与西麻山花岗岩化片麻岩相互作用形成与野外相似的交代岩和铁矿, 而天宝山的混合岩化交代的实验只有 pH = 4.5 的这种热液最有利于变质岩中铁的析出和交代岩及其铁矿的形成。

3.4.3 温度和压力 在其它条件具备时, 温度和压力是形成交代岩和铁矿的主要外界条件。通过实验表明了西麻山和天宝山的混合岩化交代岩和铁矿都在 350~650℃ 的温度和 $300 \times 10^5 \sim 700 / \times 10^5 \text{Pa}$ 压力下形成。但从图 4 和图 5 看出, 不同温度和压力产生了不同的矿物共生组合, 例如在 $500 \times 10^5 \text{Pa}$ 压力时, 从 350℃ 到 650℃ 则从 $\text{Wo} + \text{Andr} - \text{Gro} + \text{Mt} + \text{Flr} + \text{Cal} + \text{Can}$ 组合 $\rightarrow \text{Hu} - \text{Chu} + \text{Andr} - \text{Gro} + \text{Wo} + \text{Phl} + \text{Mt} + \text{Di} - \text{Hed} + \text{Tre} + \text{Mot} \rightarrow \text{Andr} - \text{Gro} + \text{Wo} + \text{Mt} + \text{Di} - \text{Hed} + \text{Tre} + \text{Phl} + \text{Flr} + \text{Sc}$ (图 4) 而在 500℃ 时, 从 $300 \times 10^5 \text{Pa}$ 到 $700 \times 10^5 \text{Pa}$ 则从钙矽卡岩化 \rightarrow 镁矽卡岩 \rightarrow 钙矽卡岩。但从总体来看, 温度对交代岩和铁矿形成的影响比压力大。

4 结 论

通过西麻山、天宝山和桐柏山矿区的野外工作和系统的混合岩化交代模拟实验, 得出以下几点认识:

(1) 无论是天然西麻山花岗岩质片麻岩作试料, 还是根据天宝山磁铁矿透辉角闪斜长麻粒岩的岩石化学成分, 用化学试剂配制试料, 在 350~650℃ 的温度, $300 \times 10^5 \sim 700 \times 10^5 \text{Pa}$ 压力下和 pH = 6.5 或 4.5 的 0.4MNaCl + 0.4MNaF + 0.2MKF 混合岩化热液, 经历了 120 个小时相互作用, 形成了与西麻山、天宝山和桐柏山矿区相似的交代岩和铁矿。

(2) 无论是西麻山还是天宝山的实验结果所形成的矿物共生组合十分相似。都是随着温度升高或压力增大, 从钙矽卡岩化矿物组合 \rightarrow 镁矽卡岩矿物组合 \rightarrow 钙矽卡岩矿物组合。其中镁矽卡岩矿物出现的范围很窄, 只在 450~600℃ 温度和 $350 \times 10^5 \sim 700 \times 10^5 \text{Pa}$ 压力的范围内形成。而钙矽卡岩和铁矿共生却在 450℃ 温度和 $350 \times 10^5 \text{Pa}$ 压力以上的条件下形成。这与西麻山、天宝山和桐柏山矿区中围岩普遍钙矽卡岩化, 镁矽卡岩只在局部地段出现和钙矽卡岩和铁矿体共同产出的实际情况相吻合。

(3) 根据西麻山、天宝山和桐柏山矿区含铁的变质岩经混合岩化后失去 TFe 为 6.10%~8.89%。实验又证明了在 $500 \times 10^5 \text{Pa}$ 下和 350~550℃ 的范围内, 从含铁的变质岩中萃取出 TFe 为 10.49~174.86mg/l。由此可见, 西麻山、天宝山和桐柏山交代岩和铁矿形成中围岩提供了主要的铁质来源。由于变质岩含铁量有限, 故形成的铁矿规模不大。

因此, 我们有根据地认为在太古代西麻山、天宝山和桐柏山地区处于浅海环境, 铁第一次富集在白云质泥灰岩等沉积岩中, 后经区域变质作用形成了含铁的透辉石岩、角闪岩、片麻岩和麻粒岩。随着地壳构造运动的演化, 再度发生强烈的混合岩化, 伴随着交代作用, 导致矽卡岩化, 使之铁从上述岩石中被交代出来, 二次富集成矿。

在野外工作期间, 得到黑龙江省地矿局第三地质队陈学礼高级工程师、第一地质调查所所长王兴华和戴所生高级工程师的支持和帮助, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 梁祥济, 缪婉萍, 张桂兰, 林月英和曲国林. 福建马坑铁矿床形成的物理化学条件的模拟实验. 福建地质, 1980, (4): 48~88
- 2 梁祥济, 缪婉萍等. 福建马坑矽卡岩分带的模拟实验. 长春地质学院院报, 1981, (2): 11~25
- 3 梁祥济, 曲国林. 福建马坑铁矿床形成的温度和压力实验的初步研究. 中国地质科学院院报, 1982, (4): 83~94
- 4 梁祥济, 程莱仙等. 福建马坑辉绿岩中铁的析出和铁矿形成铁质来源的实验研究. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1982, (1): 181~198
- 5 梁祥济, 程莱仙, 曲国林. 在高温高压下卤素和钾、钠卤化物在铁矿形成中的作用和影响. 地球科学, 1982, (3): 87~98
- 6 梁祥济, 张仲明, 李德兴. 侵入岩与碳酸盐岩接触形成交代岩的实验研究. 中国地质科学院地质研究所所刊, 1986, (15): 166~180
- 7 梁祥济, 程莱仙, 李德兴, 张仲明. 交代岩与其有关铁矿形成的铁质来源的模拟实验. 矿床地质, 1987, 6(2): 63~76
- 8 梁祥济, 乔莉. 沉积变质中交代岩和有关铁矿形成机理的实验研究. 中国地质科学院院报, 1988, (18): 159~185
- 9 梁祥济, 乔莉. 火山岩中交代岩和铁矿的实验研究. 岩石矿物学杂志, 1991, 10(4): 300~314
- 10 Liang Xiangji. Study on experiments of iron-bearing ore solution formed by interaction of containing potassium-sodium halogenide water with rocks. WRI-5. IAGC, 1986, 369~371
- 11 Kennedy G C *P-V-T* relations in water at elevated temperatures and pressures. American Journal of Science, 1950, 248: 558~564
- 12 Калинин Д В. Экспериментальные исследования физико-химических условий скарнарования. Издательство «Наука» Сибирское Отделение Новосибирск. 1969

EXPERIMENTAL STUDY ON THE FORMATION OF METASOMATIC ROCKS AND IRON DEPOSITS IN THE PROCESS OF MIGMATIZATION

Liang Xiangji

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing)

Abstract

Based on field geological study in Ximashan and Tianbaoshan ore districts of Heilongjiang Province and Tongbaishan ore district of Henan Province, the author made an experimental study on the formation of metasomatic rocks and iron deposits in the process of migmatization. In the experiment, the interaction between weakly acid migmatized hydrothermal solutions and Archean ferriferous metamorphic rocks at the temperature of 350~650°C and under the pressure of $300 \times 10^5 \sim 700 \times 10^5$ pa extracted TFe 10.49~174.86 mg/l from these rocks, consequently forming metasomatic rocks and iron ores in a weak oxidation environment. It is shown that iron in wall rocks served as the major iron source for mineralization. These data convincingly demonstrate the existence of the following evolution process: Ximashan, Tianbaoshan and Tongbaishan areas were in a neritic environment in Archean, and iron was first concentrated in such sedimentary rocks as dolomitic marl, which afterwards formed ferriferous diopsidite, amphibolite, gneiss and granulite through regional metamorphism. With the evolution of the crustal tectonic movement, migmatization took place once again, accompanied by metasomatism. This led to the skarnization of wall rocks and, as a result, iron was released from these rocks and re-concentrated to form ore deposits.