

火山岩中交代岩和铁矿的实验研究*

梁祥济 乔 莉

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

主题词: 实验研究; 火山气热液; 次火山岩-火山岩; 交代作用; 交代岩和铁矿

提 要: 本文作者在火山岩地区的新疆磁海、雅满苏和内蒙黄岗梁三个铁矿床进行野外工作的基础上, 模拟火山气热液与次火山岩-火山岩(辉绿岩、安山质凝灰岩、安山岩和凝灰质砂岩)相互作用。实验结果证明了在380—700℃和 $(250-800) \times 10^5 \text{Pa}$ 的温度和压力下形成了与上述三个矿床相似的交代岩的矿物共生组合, 并且从次火山岩-火山岩中萃取出TFe(11.89—3881.89mg/l)。由此可见, 晚期火山气热液继续沿构造断裂上升, 作用于沿途所经过的早先形成的次火山岩-火山岩, 从中萃取出大量的铁, 并在适宜的温度和压力等物理化学条件下形成了磁海、雅满苏和黄岗梁(西段)铁矿床。

交代型的铁矿在自然界分布十分广泛, 但形成途径却完全不同, 有的是侵入岩与碳酸盐岩接触形成^[1], 有的在沉积变质过程中产生^[2], 有的似乎与碳酸盐岩无关, 如新疆磁海铁矿床, 交代岩和铁矿在辉绿岩中出现^[3]; 新疆雅满苏铁矿床, 交代岩和铁矿与大理岩或灰岩接触界线清楚, 它们主要在角斑岩(以前名为钠质正长斑岩)和安山质凝灰岩中产出^[4]; 更有趣的是内蒙古黄岗梁矿床西段, 交代岩和铁矿直接在安山岩和凝灰质砂岩中出现, 其铁矿石储量约占全区总储量的3/4, 比矿区东段(花岗岩和碳酸盐岩接触形成交代岩和铁矿)富得多^[5]。这样的矿床地质特征与传统的“矽卡岩铁矿”地质特征不一致。因此, 我们试图以上述三个矿床作为重点研究对象, 通过高温高压下的成岩成矿实验来揭示它们形成的机理。

一、实验地质依据

(一) **磁海铁矿床:** 该矿床位于天山褶皱带南侧, 北天山海西优地槽的北缘。矿区内出露地层主要是下二叠世和石炭纪海相火山岩系, 由中基性—中酸性凝灰岩、熔岩和沉积岩夹层组成。海西中晚期的中基性—中酸性浅成的或次火山岩岩浆活动普遍发育, 与铁矿成矿有关的主要是顺层侵入变质凝灰岩系中的辉绿岩类复脉体群。矿体主要呈似层状, 少量呈透镜状, 成群集中产出、雁行排列。矿石矿物主要是磁铁矿, 脉石矿物主要是透辉

* 本文是在第四届全国矿床会议(1989.9, 西宁)分组会上宣读的论文基础上修改而成。

石、石榴石、透闪石和方柱石等。矿石中还伴生有Cu、Co和Ni的硫化物。

含矿带的围岩——辉绿岩普遍遭受蚀变，与成岩成矿密切相关的主要是砂卡岩化和钠长石化。强烈钠化的辉绿岩，其中失TFe (2.32%)增Na₂O(2.05%)，这很可能是钠交代了铁之故。根据磁海矿区十二个钻孔十多年来的水文观察和分析，500m以下深孔的水质属于Cl-Ca-Na型，pH=3.3—6.0；500m以上的浅孔水质属于Cl-Na型，pH=5.5—8.0。由此可见，深部地下水富Ca，酸度又较浅部大。

(二) 雅满苏矿床：该矿床位于北天山海西优地槽觉罗塔格复背斜苦水向斜之中。矿区出露的地层主要为下石炭世雅满苏组的一套以中-酸性为主并富碱(更富钾)的火山碎屑岩、类细碧-石英角斑岩、安山质凝灰岩夹正常碎屑岩及碳酸盐薄层的海相火山-沉积建造，矿体赋存于其中。矿化主要与类细碧-石英角斑岩和安山质的晶屑玻屑凝灰岩密切相关。这些岩石普遍遭受强烈的砂卡岩化、钠长石化和绿泥石化。交代岩由石榴石、透辉石、磁铁矿和硅灰石等组成，其中含有大量的角斑岩和凝灰岩残留体。层状和透镜状的铁矿体产于交代岩内，而交代岩与大理岩或灰岩接触界线清楚，未见有任何交代迹象。角斑岩强烈蚀变，析出大量的铁(TFe=3.63%)，而岩石本身增加Na₂O(Na₂O=6.30%)。矿区硫化物的硫同位素测定， $\delta^{34}\text{S}\text{‰}=1.95$ (平均)， $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}=22.177$ (平均)。

(三) 黄岗梁铁矿床：该矿床位于内蒙古燕山旋回的陆相火山岩系内。矿区出露的地层主要是下二叠世黄岗梁组的凝灰质砂岩、安山岩夹大理岩透镜体。矿区西段交代岩和铁矿直接与黄岗梁组火山岩有关。矿区西段似层状的磁铁矿矿体赋存在凝灰质砂岩和安山岩中的交代岩内。交代岩由石榴石、透辉石、透闪石、磁铁矿和符山石等矿物组成，其中普遍见有安山岩和凝灰质砂岩的蚀变残留体。交代岩仍保留有火山岩的层状结构和构造。与成矿有关的安山岩普遍蚀变，强烈的钠化安山岩比未蚀变的安山岩中Na₂O增加(3.54%)而TFe减少(3.12%)。根据矿区石榴石和石英内矿物包裹体气-液相成分分析，成矿溶液属于F-Cl-SO₄²⁻型和Cl-SO₄²⁻型，pH=4.04—4.49。

从磁海、雅满苏和黄岗梁西段的铁矿床主要的地质特征可以看出：它们均处于火山活动的构造断裂带中，交代岩的原岩系火山岩和次火山岩，钠质交代强烈，围岩失铁明显，岩石和矿物中挥发分较多，硫来自下地壳和上地幔，可以说明磁海、雅满苏和黄岗梁西段的铁矿床是晚期富钠的酸性火山气热液沿着断裂构造上升，与含铁较高的辉绿岩、角斑岩、安山岩和凝灰质砂岩等发生钠质交代，从中萃取出大量的铁，同时在适宜的温度、压力、溶液酸碱度和氧化-还原条件下形成了交代岩，铁富集于其中，形成了矿体。这就是我们进行实验的野外地质依据。

二、实验技术和方法

(一) 实验样品：实验样品来自未遭受蚀变(或轻度蚀变)的新疆磁海辉绿岩、新疆雅满苏安山质凝灰岩、内蒙古黄岗梁安山岩和凝灰质砂岩。它们均系交代岩和铁矿的直接围岩，其岩石的矿物成分和化学成分分别列于表1和表2。

(二) 反应溶液：根据火山气体和液体组分及其pH值^[6,7]，结合磁海、雅满苏和黄岗梁西段的火山岩和次火山岩强烈蚀变、磁海12个水文孔水质化学分析和黄岗梁矿物气液包裹体成分分析，模拟配制了火山气热液：

表 1 实验样品的矿物成分

Table 1 The mineral compositions of experimental samples

样品名称	矿区名称	采样地点	样品编号	矿物成分		备注
				主要矿物	次要矿物	
辉绿岩	新疆磁海	ZK207 33m处	Z9	斜长石(An=50-60)50% 普通辉石 45%	黑云母 4%	轻度蚀变
安山质凝灰岩	新疆雅满苏	ZK90 253m处	N046	斑晶: 晶屑 斜长石45% 基质: 微晶斜长石25%	斑晶: 角闪石晶屑 4% 安山岩岩屑 3% 基质: 微晶石英 2%	
安山岩	内蒙古黄岗梁	I区ZK4/77 156.9m处	f5	斑晶: 斜长石20-25% 角闪石15-20% 基质: 微晶斜长石30%	斑晶: 透辉石<2% 基质: 微晶石英15% 绢云母 4%	轻度蚀变
凝灰质砂岩	内蒙古黄岗梁	II区ZK4/176 252.5m处	f19	石英50-60% 长石30-50%	绢云母<3%	

表 2 实验样品的化学成分

Table 2 The chemical compositions of experimental samples

样品名称	样品编号	化 学 成 分 (%)									
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
辉绿岩	Z9	49.16	2.38	14.08	0.33	6.46	0.12	9.77	4.08	0.94	4.49
安山质凝灰岩	N046	51.02	0.73	16.48	0.99	9.06	0.18	2.20	4.79	4.40	4.31
安山岩	f5	52.48	1.73	16.59	0.62	5.67	0.13	8.86	5.13	0.82	4.49
凝灰质砂岩	f19	64.00	0.77	15.67	0.22	3.26	0.014	3.33	1.82	4.21	3.16

样品名称	样品编号	化 学 成 分 (%)								
		CuO	ZnO	CO ₂	SO ₃	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	F	Cl	总量
辉绿岩	Z9	3.03	1.38	1.60	0.05	1.32	0.24	0.11	0.06	99.60
安山质凝灰岩	N046	1.87	0.86		0.52	2.42	0.10	0.30	0.04	100.27
安山岩	f5	1.41	0.14		0.17	0.60	0.06	0.74	0.055	99.70
凝灰质砂岩	f19	0.95	0.11	0.09	1.92	0.28	0.18	0.28	0.05	100.31

分析者: 中国地质科学院岩矿测试技术研究所, 杨桂芳 (1982)。

磁海: (1) $0.2\text{M}\text{CaO} + 0.3\text{M}\text{CaCl}_2 + 0.3\text{M}\text{Na}_2\text{CO}_3 + 0.2\text{M}\text{NaCl}$

加几滴($\text{HCl} > \text{H}_2\text{SO}_4 > \text{H}_3\text{PO}_4$)水溶液, $\text{pH} = 2.5$

(用于萃取铁的实验)

(2) 携带少量的 CaO 、 Fe_2O_3 的 $0.2\text{M}\text{CaO} + 0.3\text{M}\text{CaCl}_2 + 0.3\text{M}\text{Na}_2\text{CO}_3 + 0.2\text{M}\text{NaCl}$ 水溶液, $\text{pH} = 11.0$

(用于交代作用实验)

雅满苏: (1) $0.2\text{M}\text{CaO} + 0.3\text{M}\text{CaCl}_2 + 0.3\text{M}\text{Na}_2\text{CO}_3 + 0.2\text{M}\text{NaCl}$

加几滴 ($HCl > H_2SO_4 > H_3PO_4$) 水溶液, $pH=2.5$

(用于萃取铁的实验)

(2) 携带少量的 CaO 、 Fe_2O_3 的 $0.2M CaO + 0.3M CaCl_2 + 0.3M Na_2CO_3 + 0.2M NaCl$ 水溶液, $pH=2.5$

(用于交代作用实验)

黄岗梁: (1) $0.9M NaF + 0.1M KCl$ 加几滴 ($H_2SO_4 > H_3PO_4$) 水溶液, $pH=3.0$

(用于萃取铁的实验)

(2) 携带少量的 CaO 、 MgO 和 Fe_2O_3 的 $0.2M CaO + 0.3M CaCl_2 + 0.3M Na_2CO_3 + 0.2M NaCl$ 水溶液, $pH=2.5$ (用于交代作用实验)

(三) 实验温度和压力: 根据北京大学地质系黄福生对磁海矿区 (1977)、中国地质科学院西安所宋治杰对雅满苏矿区 (1980)、中国地质科学院矿床所和沈阳所对黄岗梁矿区 (1980、1979) 的矿物包裹体测温、氧同位素和地温计法测量和计算的成岩成矿温度, 结合各矿区矿体埋藏的深度, 分别将:

磁海, 实验温度考虑为 $400-700^{\circ}C$, 实验压力 $(250-700) \times 0.1MPa$;

雅满苏, 实验温度考虑为 $350-700^{\circ}C$, 实验压力 $(300-800) \times 0.1MPa$

黄岗梁 实验温度考虑为 $300-700^{\circ}C$, 实验压力 $(300-700) \times 0.1MPa$ 。

(四) 实验设备: 实验在冷封自紧式高压釜中进行。样品焊封在金和银试管内, 或放在带孔的金篮中, 悬挂在带有金或银衬套的高压釜反应腔顶部。高压釜的反应腔正好位于 SRT 型的实验电炉的恒温区。实验温度则由 DWK-703 型控温仪控制, 用一等标准单铂铑 LB-3 热电偶测量, 误差为 $\pm 1^{\circ}C$ 。压力据 G·C·肯尼迪 (1950)⁽⁸⁾ 填充度计算。实验样品在十万分之一的天平上称重, 固体实验样品称重为 $120-200mg$ 。

(五) 实验产物的鉴定和有关问题: 交代实验的固相产物通过显微镜、X光和红外光谱分析定出矿物的确切名称。对于铁质来源实验的液相产物, 打开高压釜后, 马上进行 FeO 和 Fe_2O_3 分析。本文所附的图, 如果图上点连线呈线性变化, 采用回归方程 $y=a+bx$ 计算出斜率画出, 如果呈弧形变化均按内插法处理。

三、实验结果和讨论

通过141次实验, 其结果分别叙述如下, 并对它们形成的物理化学条件进行分析和讨论。

(一) 实验形成的主要矿物特征

在磁海、雅满苏和黄岗梁西段的实验中, 出现了硅灰石、钙铁榴石, 钙铝榴石、透辉石、透闪石、符山石、阳起石、钙铁辉石、磁铁矿、针柱石、钠柱石, 硬石膏、绿帘石、黝帘石、绿泥石、绢云母和方钠石等十多种矿物 (照片)。由于篇幅限制, 矿物特征的描述和它们X光衍射谱线图从略。矿物名称用代号标出^①。

①本文矿物名称代号如下:

Ab—钠长石; Andr—钙铁榴石; Anc—拉长石; Anh—硬石膏; Ann—铁黑云母; Aug—普通辉石; Cal—方解石; Chl—绿泥石; Di—透辉石; Dip—针柱石; Dol—白云石; Fr—萤石; Zo—黝帘石; Gro—钙铝榴石; He—钙铁辉石; Hb—角闪石; Mar—钠柱石; Mi—微斜长石; Mt—磁铁矿; Ser—绢云母; Sod—方钠石; Trc—透闪石; Ve—符山石; Wo—硅灰石。

(二) 实验所形成的矿物共生组合

我们用配制的含Ca、Mg、Fe的火山气热液在不同的温度和压力等条件下，分别作用于磁海的辉绿岩、雅满苏的安山质（晶屑玻屑）凝灰岩和内蒙古黄岗梁的安山岩的模拟实验，其结果列于表3、4、5，并分别绘制出它们的矿物共生组合的P-T图（图1、2、3）。

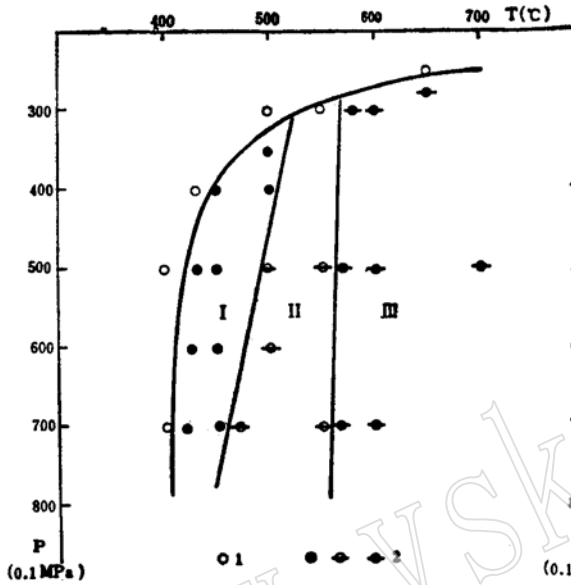


图1 火山气热液与磁海辉绿岩相互作用形成交代岩的矿物共生组合P-T图
Fig.1 P-T diagram of paragenetic association of mineral showing the metasomatites formed on the interactions of volcanic gas-hydrothermal solutions and Cihai diabase

1—未形成新矿物； 2—形成了新矿物
I—Dip - Mar + Wo + Tre + Andr - Gro + Mt + Di
II—Tre + Andr - Gro + Mt + Di + Wo + Anh + Fr
III—Andr - Gro + Di + Tre + Wo + Mt + Ve + Sod

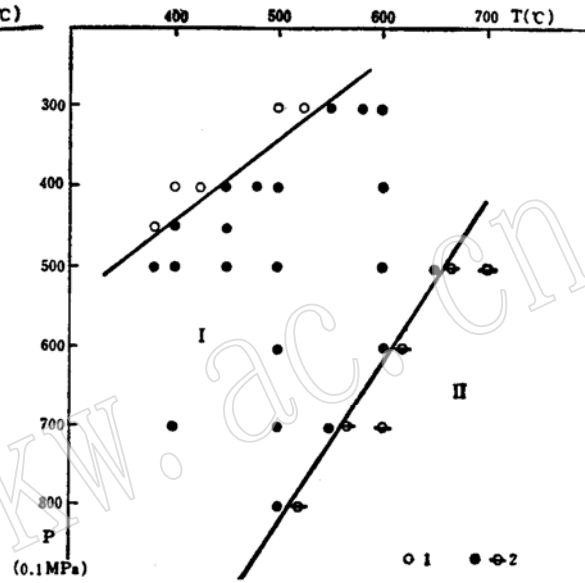


图2 火山气热液与雅满苏安山质凝灰岩相互作用形成交代岩的矿物共生组合P-T图
Fig.2 P-T diagram of paragenetic association of mineral showing the metasomatites formed on the interactions of volcanic gas-hydrothermal solutions and Yamansu andesite-tuffs

1—未形成新矿物； 2—形成了新矿物
I—Anh + Wo + Andr - Gro + Mt + Cal + Di + Ser + Mar
II—Andr - Gro + Wo + Mt + He

(1) 从图1看出磁海矿区交代岩形成的物理化学条件。随着温度和压力的变化，实验所产生的矿物共生组合分为三组：

I — Dip - Mar + Wo + Tre + Andr - Gro + Mt + Di

II — Tre + Andr - Gro + Mt + Di + Wo + Anh + Fr

III — Andr - Gro + Di + Tre + Wo + Mt + Ve + Sod

这些矿物共生组合与磁海矿区交代岩的实际情况基本相吻合。因此，我们认为磁海交代岩及其铁矿在420—700℃的温度和(270—700)×0.1MPa的压力下形成。

(2) 图2表明了雅满苏矿区交代岩形成的物理化学条件。根据实验所产生的典型矿

●下边画横线的矿物表示该组矿物的特征矿物，以下同。

表3 新疆磁海辉绿岩在不同温度和压力下交代实验的固相产物

Table 3 The solid products of the metasomatic experiments of the diabase from Cihai mine in Xinjiang under different temperatures and pressures

实验号 (No.)	实验温度 (T/°C)	实验压力 (P, MPa)	实验后溶 液 pH	实验持续 时间(h)	新形成的固相产物*
634	400	500	7.5	120	未形成新矿物
510	400	700	9.0	136	试料基本不变
1052	420	700	7.5	120	Wo, Dip-Mar, Andr-Gro, Tre
631	425	600	7.0	120	Wo, Dip-Mar, Tre
1044	430	400	7.0	120	试料基本不变
1050	430	500	7.0	120	Dip-Mar, Wo, Tre
1041	450	400	7.0	120	Wo, Tre, Andr, Dip-Mar
630	450	500	7.0	120	Wo, Tre, Mar
626	450	600	7.5	120	Dip, Di, Tre, Mt, Gro, Wo
1051	450	700	7.5	120	Andr-Gro, Dip-Mar, Tre, Mt, Wo
1047	470	700	7.5	120	Wo, Andr-Gro, Tre, Mt
532	500	300	7.5	144	未形成新矿物
1040	500	350	7.5	120	Gro, Wo, Tre, Dip-Mar
511	500	400	7.0	136	Wo, Tre, Dip-Mar
500	500	500	8.0	144	Tre, Mt, Gro, Fr
513	500	600	8.0	136	Wo, Gro, Anh, Tre, Fr, Mt
627	550	300	7.0	120	Tre, Gro, Mt, Di
1042	550	500	8.0	120	Tre, Gro-Andr, Wo, Mt, Di
1043	550	700	7.5	120	Tre, Gro-Andr, Wo, Mt, Di
1046	565	700	5.0	120	Gro-Andr, Tre, Di, Wo
1045	570	500	7.0	120	Gro-Andr, Wo, Tre, Di
1048	580	300	7.0	120	Tre, Di, Andr-Gro
512	600	300	8.0	136	Wo, Tre, Di, Gre
501	600	500	8.0	144	Wo, Mt, Gro, Tre, Di, Sod
503	600	700	8.0	144	Wo, Di, Gro, Mt, Sod
1049	650	270	7.0	120	Wo, Andr-Gro, Tre, Di
1073	650	250	7.5	120	未形成新矿物
502	700	500	8.0	144	Gro, Wo, Di, Tre, Ve

实验试样称重: 辉绿岩 90mg, CaO 10mg, Fe₂O₃ 20mg。

实验介质化学成分: 0.2M_{Ca}O + 0.3M_{Ca}Cl₂ + 0.3M_{Na}CO₃ + 0.2M_{Na}Cl水溶液。

实验介质pH = 11.0。

* 表中该栏内, 矿物相对含量, 前者为多, 依次递减, 后者最少, 下列诸表同此。

表 4 新疆雅满苏安山质凝灰岩在不同温度和压力下交代实验的固相产物
 Table 4 The solid products of the metasomatic experiments of the andesite-tuff from Yamansu mine in Xinjiang under different temperatures and pressures

实验号 (No)	实验温度 (T °C)	实验压力 (0.1MPa)	实验后溶 液 pH	实验持续 时间(h)	新形成的固相产物*
1031	380	450	5.5	120	试料基本不变, 未形成新矿物
1032	380	500	5.0	120	Mt, Anh, Andr, Wo
533	400	400	5.5	120	试料基本不变, 未形成新矿物
1020	400	450	5.0	120	Anh, Andr, Wo
523	400	500	6.5	144	Anh, Wo, Andr
514	400	700	5.0	136	Anh, Wo, Andr
632	425	400	6.5	120	试料基本不变, 未形成新矿物
624	450	400	8.0	120	Wo, Mt, Andr, Anh
1021	450	450	7.0	120	Anh, Andr, Wo
1023	450	500	6.5	120	Andr, Anh, Wo, Cal
1034	480	400	5.5	120	Wo, Gro, Mt, Anh
534	500	300	5.5	120	试料基本不变
515	500	400	5.0	136	Anh, Mt, Di, Wo, Ser, Andr
520	500	500	5.5	144	Andr-Gro, Di, Mt, Anh, Wo
517	500	600	5.0	136	Gro, Wo, Anh, Mar
620	500	700	7.0	92	Wo, Gro, Mar, Tre, Anh
1029	500	800	6.5	120	Wo, Tre, Mar, Anh, Gro
1030	520	800	6.0	120	Wo, Di, Andr-Gro, Mt,
633	525	300	8.0	120	试料基本不变
625	550	300	8.0	120	Wo, Gro, Mt, Anh
1022	550	700	6.0	120	Anh, Andr, He, Wo
1026	565	700	5.0	120	Andr, He, Mt, Wo
1033	580	300	5.0	120	Gro, Wo, Anh, Mt
516	600	300	7.0	144	Gro, Wo, Mt, Anh
539	600	400	5.0	92	Gro, Wo, Di, Mt, Anh
521	600	500	5.5	144	Anh, Gro, Wo, Di, Mt
1024	600	600	6.2	120	Anh, Andr, Wo, Mt
524	600	700	6.5	144	Gro, Di, Wo, He
1027	620	600	5.5	120	Anh, Andr, Wo, Mt
1025	650	500	6.0	120	Andr, Anh, He, Wo
1028	665	500	6.0	120	Andr, Mt, He, Wo
622	700	500	7.0	120	Wo, Mt, Di, Gro-Andr

实验试样称重: 安山质凝灰岩 100mg, CaO 20mg, Fe₂O₃ 20mg。
 实验介质化学成分: 0.2M CaO + 0.3M CaCl₂ + 0.3M Na₂CO₃ + 0.2M NaCl 水溶液。
 实验介质 pH = 2.5。

表5 内蒙古黄岗梁安山岩在不同温度和压力下交代试验的固相产物
 Table 5 The solid products of the metasomatic experiments of the andesite from Huanggangliang mine in Inner Mongolia under different temperatures and pressures

实验号 (No)	实验温度 (T/°C)	实验压力 (0.1MPa)	实验后溶 液 pH	实验持续 时间(h)	新形成固相产物
1069	380	450	7.0	120	试料基本不变
535	400	400	7.0	120	试料基本不变
1063	400	450	5.0	120	Anh, Wo, Gro, Di, Tre
629	400	475	7.0	120	Wo, Andr, Di, Tre, Anh
527	400	500	6.5	144	Anh, Tre, Wo, Andr, Di, Mt
530	400	700	8.0	144	Gro, Tre, Zo, Di, Anh, Mt
622	450	400	7.0	120	试料基本不变
1068	470	400	8.0	120	Andr-Gro, Di, Tre, Mt, Anh
536	500	300	7.0	120	试料基本不变
1071	500	350	7.5	120	试料基本不变
628	500	375	7.5	120	Andr-Gro, Di, Anh, Tre
529	500	400	8.0	144	Gro, Zo, Anh, Tre, Di
525	500	500	6.5	144	Di, Gro, Tre, Mt, Anh, Zo
538	500	600	6.0	120	Gro, Mt, Di, Tre, Dol, Zo, Anh
623	550	300	10.0	120	试料基本不变
1060	550	500	7.5	120	Dol, Andr, Anh, Mt, Tre, Di
1062	550	700	6.5	120	Andr, Anh, Tre, Di, Mt
1067	570	500	6.0	120	Andr, Mt, Tre, Di, Zo, Wo
1071	570	700	5.0	120	Andr-Gro, Mt, Zo, Wo, Di, Tre
1064	580	300	6.0	120	试料基本不变
1066	580	400	6.5	120	Gro, Zo, Tre, Di, Mt, Anh
531	600	300	9.0	144	Gro, Zo, Tre, Di, Anh
1061	600	350	7.0	120	Anh, Gro, Tre, Di
537	600	400	5.0	120	Wo, Mt, Gro, Zo
518	600	500	5.0	135	Gro, Tre, Mt, Di, Wo, Ve
528	600	700	6.5	144	Tre, Wo, Andr, Mt
1070	630	300	6.5	120	Andr-Gro, Mt, Di, Tre, Wo, Zo, Ve
1065	650	300	7.0	120	Andr, Di, Mt, Tre, Wo
621	700	500	6.0	120	Mt, Gro, Di, Wo

实验试样称重: 安山岩 70mg、CaO 15mg、MgO 15mg、Fe₂O₃ 20mg。

实验介质化学成分: 0.2M CaO + 0.3M CaCl₂ + 0.3M Na₂CO₃ + 0.2M NaCl 水溶液。

实验介质 pH=2.5。

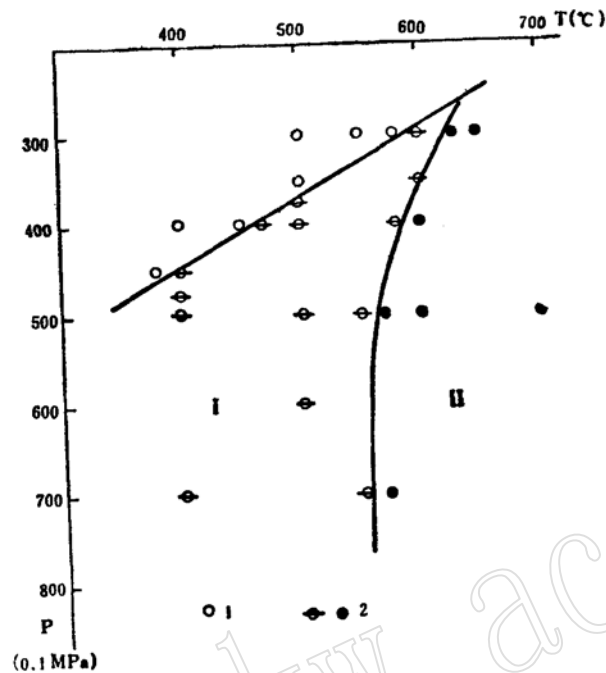


图3 火山气热液与黄岗梁安山岩相互作用形成交代岩的矿物共生组合P-T图

Fig.3 P-T diagram of paragenetic association of mineral showing the metasomatites formed on the interactions of volcanic gas-hydrothermal solutions and Huanggangliang andesites

- 1—未形成新矿物； 2—形成了新矿物
 I— $Anh + Gro - Andr + Di + Tre + Wo + Mt + Zo + Dol$
 II— $Andr - Gro + Wo + Mt + Ve + Di + Tre + Zo$

物随温度和压力变化的特点，划分出两个矿物组合：

- I — $Anh + Wo + Andr - Gro + Mt + Cal + Di + Ser + Mar$
 II — $Andr - Gro + Wo + Mt + He。$

这些矿物共生组合大体上与雅满苏矿区交代岩的矿物组合相一致。I组矿物组合相当于矿区的复杂砂卡岩；II组矿物组合近似于简单砂卡岩。这就证明了雅满苏交代岩和铁矿是在380—700℃和(300—800)×0.1MPa的温度和压力条件下产生的。

(3) 图3反映了黄岗梁西段交代岩形成的物理化学条件。根据矿物共生组合随温度和压力变化的特点，可将它们分为两个矿物组合：

- I — $Anh + Andr - Gro + Di + Tre + Wo + Mt + Zo + Dol$;
 II — $Andr - Gro + Wo + Mt + Ve + Di + Tre + Zo$

这些矿物共生组合与黄岗梁矿区西段交代岩的矿物共生组合基本上相似。这就说明了黄岗梁矿区西段交代岩和铁矿形成的温度为400—700℃，压力为(300—700)×0.1MPa。

(三) 关于“铁质来源”实验的结果

我们用配制的不同pH值的酸性火山气热液分别作用于辉绿岩(磁海)、安山质凝灰岩(雅满苏)、安山岩(黄岗梁)和凝灰质砂岩(黄岗梁)，从中萃取出铁的结果，绘成

图4、5、6和7。从图4—7和实验数据反映出,在500或600×0.1MPa压力下,在350—650℃的温度范围内,酸性反应溶液从次火山岩(辉绿岩)、火山岩和火山沉积岩中萃取出铁的特点是:

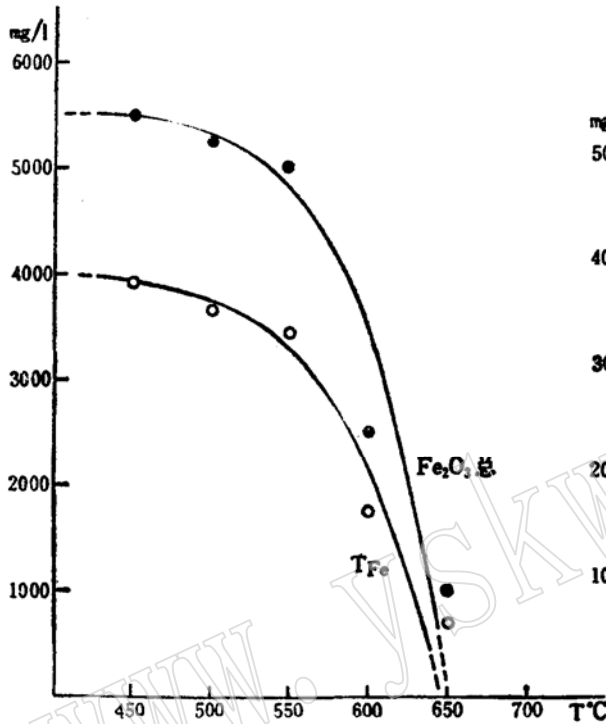


图4 在600×0.1MPa的压力下从绿辉岩中萃取出 Fe_2O_3 和 FeO 的量随温度变化的曲线(新疆,磁海)

Fig. 4 The curves of the variations in quantities of Fe_2O_3 and FeO extracted from diabase with varying temperatures under 600×0.1MPa pressure (Cihai, Xinjiang)

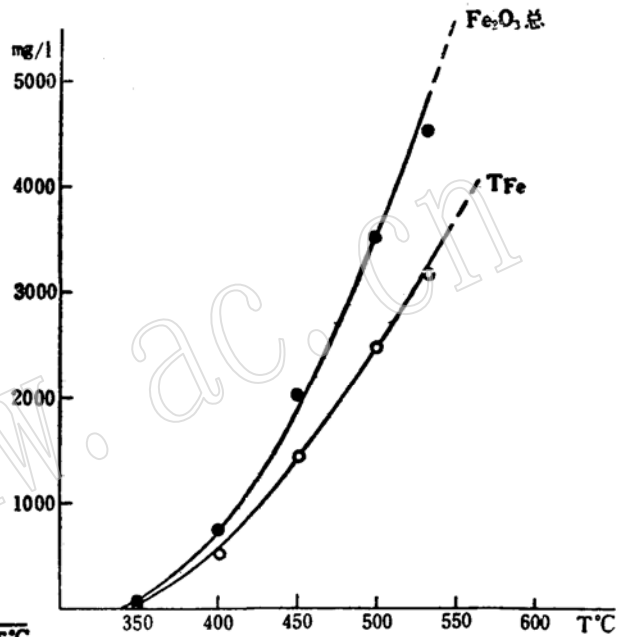


图5 在600×0.1MPa的压力下从安山质凝灰岩中萃取出 Fe_2O_3 和 FeO 的量随温度变化的曲线(新疆,雅满苏)

Fig. 5 The curves of the variations in quantities of Fe_2O_3 and FeO extracted from andesitic tuff with varying temperatures under 600×0.1MPa pressure (Yamansu, Xinjiang)

(1) 铁在溶液中主要呈 Fe^{2+} 迁移, Fe^{3+} 的含量比 Fe^{2+} 少得多;

(2) 从岩石中析出 FeO 和 Fe_2O_3 的量随着温度升高出现了两种变化:

A、随着温度升高,绝大部分岩石中铁的析出量(T_{Fe})随之增大,有的呈线性增加,如黄岗梁安山岩;一般呈弧形变化,尤其在高温下铁的析出量比低温下大得多,如雅满苏安山质凝灰岩和黄岗梁凝灰质砂岩。

B、随着温度升高,岩石中铁的析出量呈抛物线减少,同时,在高温下铁几乎都呈 Fe^{2+} 形式存在,如磁海辉绿岩。

(3) 铁析出量与反应后溶液的pH呈线性相关的趋势,溶液的酸度越大,铁的析出量越多。

(4) 实验前的酸性溶液,在萃取铁的实验过程中,逐渐趋向于弱酸性—中性。

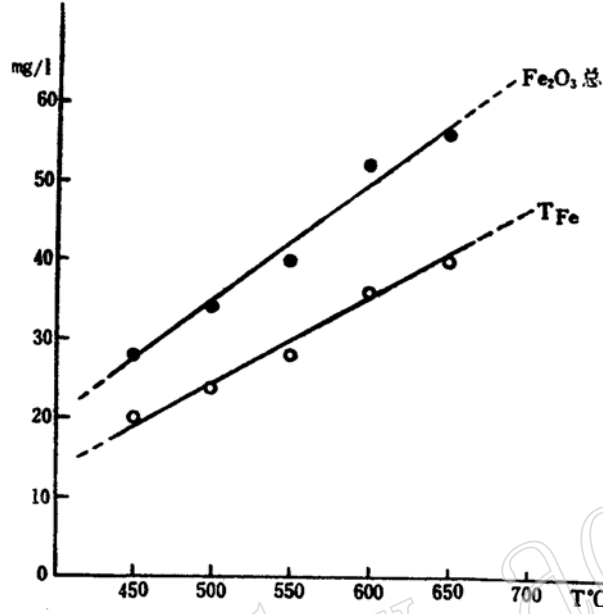


图 6 在 500×0.1 MPa的压力下从安山岩中萃取出 Fe_2O_3 和FeO的量随温度变化的曲线 (内蒙古, 黄岗梁)

Fig. 6 The curves of the variations in quantities of Fe_2O_3 and FeO extracted from andesite with varying temperatures under 500×0.1 MPa pressure (Huanggangliang, Inner Mongolia)

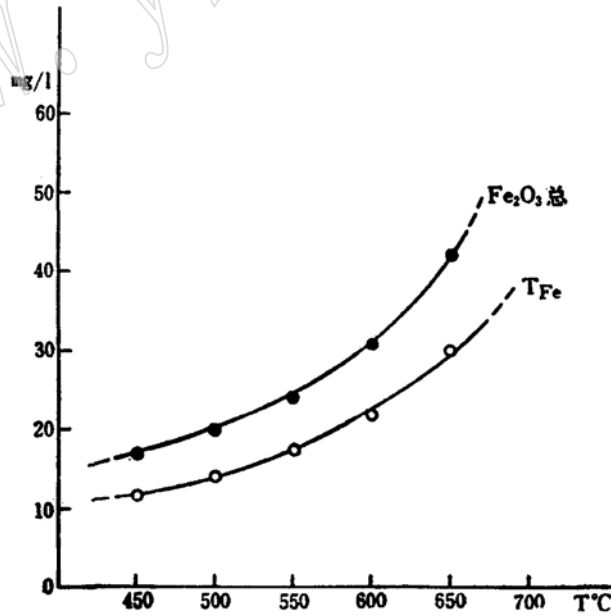


图 7 在 500×0.1 MPa的压力下从凝灰质砂岩中萃取出 Fe_2O_3 和FeO的量随温度变化的曲线 (内蒙古, 黄岗梁)

Fig. 7 The curves of the variations in quantities of Fe_2O_3 and FeO extracted from tuffaceous sandstone with varying temperatures under 500×0.1 MPa pressure (Huanggangliang, Inner Mongolia)

上述这些现象与我们以前的实验结果相一致^[9,10,11]。

(四) 形成交代岩和铁矿的物理化学条件分析。

(1) 物质组成、反应溶液成分及其pH是交代岩和铁矿形成的关键^[12,13,14]

物质组成是形成交代岩和铁矿的决定因素，它与反应溶液的成分及其pH值密切相关。在给定的温度和压力下，一定的物质组分将会产生一定的交代岩矿物共生组合，如果改变物质组成，其所产生的矿物也随之改变。同时，即使物质组成固定，而反应溶液成分不一样，其最终实验产物也不相同。有时物质组成和反应溶液都一样，仅反应溶液的pH点不同，其结果却完全不一样。我们在磁海、雅满苏和黄岗梁西段的条件实验中证明了这一点（见表6）。

表6 内蒙黄岗梁西段条件实验的结果

Table 6 The results of the conditional experiments from Huanggangliang mine (west part), Inner Mongolia

实验号 (No)	实验样品	反应溶液	附加物	实验 T °C	实验 P(0.1MPa)	实验前 pH	实验后 pH	实验固相产物
489	安山岩 90mg	0.9MNaF + 0.1MKCl + 8滴(H ₂ SO ₄ + H ₃ PO ₄)	CaO 30mg	600	500	4.0	6.5	试料表面脏乱。未 形成新矿物
400	安山岩 90mg	0.9MNaF + 0.1MKCl + 微量(0.1MNaOH + 0.1M KOH)	CaO 30mg	600	500	7.0	6.5	未形成新矿物
491	安山岩 90mg	0.9MNaF + 0.1MKCl + 少量(0.1MNaOH + 0.1 MKOH)	CaO 30mg	600	500	10.0	6.5	试料基本不变
498	安山岩 90mg	0.2MCaO + 0.3MCaCl ₂ + 0.3MNa ₂ CO ₃ + 0.2 MNaCl + 几滴(HCl > H ₂ SO ₄ > H ₃ PO ₄)	CaO 30mg	500	500	5.0	6.0	偶见硅灰石、透闪 石、石榴石—钙铝 榴石
499	安山岩 90mg	同上	CaO 30mg	700	500	5.0	6.0	偶见磁铁矿、叶绿 泥石、绢云母
518	安山岩 70mg	0.2MCaO + 0.3MCaCl ₂ + 0.3MNa ₂ CO ₃ + 0.2 MNaCl + 几滴(HCl > H ₂ SO ₄ > H ₃ PO ₄)	CaO 15mg MgO 15mg Fe ₂ O ₃ 20mg	600	500	2.50	5.0	钙铝榴石、透闪石 —阳起石、磁铁矿、 硅灰石、透辉石、 符山石
519	安山岩 70mg	0.2MCaO + 0.3MCaCl ₂ + 0.5MNa ₂ CO ₃ + 0.2 MNaCl	同上	600	500	11.0	7.5	试料基本不变

从表6中可以看出：在600℃、500×0.1MPa的温度和压力下，只有含一定量的Ca、Mg、Fe的酸性的0.2MCaO + 0.3MCaCl₂ + 0.3MNa₂CO₃ + 0.2MNaCl + 几滴(HCl > H₂SO₄ > H₃PO₄)溶液与安山岩相互作用，才能形成与黄岗梁西段的交代岩相一致的矿物组合。同样，磁海条件实验说明辉绿岩只能在600℃、500×0.1MPa的温、压条件下，遭受含有一

定量的Ca和Fe的碱性 ($\text{pH}=11.0$) 的 $0.2\text{M}\text{CaO}+0.3\text{M}\text{CaCl}_2+0.3\text{M}\text{Na}_2\text{CO}_3+0.2\text{M}\text{NaCl}$ + 几滴 ($0.1\text{M}\text{NaOH}+0.1\text{M}\text{KOH}$) 溶液的作用, 方可形成与矿区相似的交代岩和铁矿; 雅满苏条件实验也证明了, 只有在 600°C 、 $500\times 0.1\text{MPa}$ 的温压条件下, 含有Ca、Fe的酸性 ($\text{pH}=2.5$) 的 $0.2\text{M}\text{CaO}+0.3\text{M}\text{CaCl}_2+0.3\text{M}\text{Na}_2\text{CO}_3+0.2\text{M}\text{NaCl}$ + 几滴 ($\text{HCl}>\text{H}_2\text{SO}_4>\text{H}_3\text{PO}_4$) 溶液作用于安山质凝灰岩, 才能出现与矿区相类似的矽卡岩。

(2) 温度和压力对交代岩中矿物共生组合的影响

物质组成和反应溶液成分的性质确定后, 温度和压力直接影响着形成交代岩的矿物共生组合。有的是温度起了主导作用, 例如磁海 (见图4), 随着温度升高 ($400-700^\circ\text{C}$), 从针-钠柱石+硅灰石+透闪石+钙铁-钙铝榴石+磁铁矿+透辉石(I)经透闪石+钙铁-钙铝榴石+磁铁矿+透辉石+硅灰石+硬石膏+萤石(II)变为钙铁-钙铝榴石+透辉石+透闪石+硅灰石+磁铁矿+符山石+方钠石(III), 但压力对它们影响不大。有的是受温度和压力同时控制, 后由温度起主导作用, 如黄岗梁西段的实验 (图6), 先随温度和压力同时升高和增大, 出现了硬石膏+钙铁-钙铝榴石+透辉石+透闪石+硅灰石+磁铁矿+绿帘石+白云石矿物组合 (I), 当温度达到 $570-600^\circ\text{C}$ 时, 则变为钙铁-钙铝榴石+硅灰石+磁铁矿+符山石+透辉石+透闪石+绿帘石(II), 而压力对它影响甚少, 即 $(300-800)\times 0.1\text{MPa}$ 下, 都能形成该类矿物共生组合。

(3) 温度和反应溶液的pH值对岩石中铁的活化和迁移的作用

在次火山岩 (辉绿岩)、火山岩和火山沉积岩铁的活化、迁移的实验中, 温度和反应溶液的pH值起了决定性的作用。从岩石中萃取出铁的量与温度呈正相关, 与反应溶液的pH值呈负相关。如雅满苏, 从 350 到 550°C , 从安山质 (晶屑玻屑) 凝灰岩中萃取出铁的量从 21.6 到 4049.10mg/l , 而实验后反应溶液的pH值从 5.6 降到 4.0 。这是由于酸性的含K、Na的卤化物水溶液随着温度升高, 其一溶液络合能力加强, 络合物的稳定性也增大; 其二溶液中有卤盐存在, 使之溶液的临界点上升; 其三溶液中电离度增大, H^+ 离子增多。因此, 溶液从岩石中萃取出铁的含量增多, 而本身的pH值却随之降低。

(4) 氧逸度 (f_{O_2}) 和氧化-还原环境是形成交代岩及铁矿不可缺少的条件

我们在条件实验中证明了只有加入一定量 Fe_2O_3 才能形成交代岩的矿物共生组合 (表6)。显然, Fe_2O_3 既作为试料物质成分的一部分同时也起了缓冲控制氧逸度的作用。同理, 在铁析出实验的过程中, 随着温度升高, 水溶液中电离度增大, H^+ 离子增多, O_2 也增多, 从岩石中萃取出铁的量也随之增多。但由于在磁海辉绿岩铁析出实验中所配制的反应溶液多放了一些 H_3PO_4 , 引起了溶液还原反应, 导致随着温度升高, 铁析出量反而减少。由此可见, 氧逸度高或氧化、弱氧化环境有利于交代岩及铁矿的形成。

四、几点认识

通过磁海、雅满苏和黄岗梁西段的一系列系统实验证明了:

1、磁海铁矿在 $400-700^\circ\text{C}$ 温度和 $(270-700)\times 0.1\text{MPa}$ 压力下, 含一定量Ca、Fe的酸性-碱性的晚期火山气热液作用于次火山岩——辉绿岩, 形成了交代岩和铁矿; 雅满

苏铁矿床是含一定量Ca、Fe的酸性晚期火山气热液与安山质(晶屑玻屑)凝灰岩等火山岩相互作用,在380—700℃的温度和(300—800)×0.1MPa的压力下,形成了交代岩和铁矿;而黄岗梁西矿段则是由含Ca、Mg、Fe的酸性晚期火山气热液与安山岩、凝灰质砂岩相互作用产生了交代岩和铁矿,它们成岩成矿的温度为400—700℃,压力为(300—700)×0.1MPa。

2. 以钠质为主的Na、K酸性晚期火山气热液作用于磁海辉绿岩、雅满苏安山质凝灰岩和黄岗梁西段的安山岩和凝灰质砂岩,从中萃取出 T_{Fe} 分别是699.44—3881.89mg/l、19.58—3147.48mg/l、19.58—39.17mg/l和11.89—29.98mg/l。磁海矿区除辉绿岩以外,还有含铁较高的中基性杂岩体和矿区外围的玄武岩和安山岩,它们分布很广;雅满苏含Fe较高的角斑岩、安山质凝灰岩出露范围大;黄岗梁西段含铁较富的安山岩和凝灰质砂岩等大面积地分布。这些次火山岩、火山岩和火山沉积岩遭受钠化强烈交代,将会在成岩成矿过程中提供大量的铁。

3. 物质成分和反应溶液是形成交代岩及其铁矿的根本因素,而温度、压力、反应溶液的pH值和 f_{O_2} 等是影响它们形成的主要条件。通过含Ca、Mg、Fe的火山气热液作用于火山岩—次火山岩的实验,又证明了只要有Si、Al、Fe、Ca、Mg等主要元素存在,加上一定量 H_2O 、 CO_2 、Cl、F等挥发分,在适宜的温度、压力和适宜的pH值溶液和氧化环境中都可以形成交代岩及其铁矿床。这又一次打破了交代岩形成的传统概念,进一步证明交代岩及铁矿形成是多成因的。

因此,我们认为晚期火山气热液继续沿构造断裂带上升,作用于沿途所经过的早先形成的已经固化的火山岩—次火山岩,从中萃取出相当量的Fe,在上述适宜的温度和压力等物理化学条件下形成了黄岗梁、雅满苏和磁海的交代岩和铁矿。

在野外工作期间,承蒙甘肃省地质局第四地质队李增明、谢治俊,雅满苏铁矿张谷生,新疆自治区地质局第六地质大队杜永霖,内蒙古自治区地质局113队腾玉良、李子冠等高级工程师的支持,实际工作中得到了曲国林、杨桂芳和周金发同志的帮助,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 梁祥济、张仲明、李德兴, 1986, 侵入岩与硫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刊, 第15号, 166—179。
- [2] 梁祥济、乔莉, 1988, 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, 第18号, 159—184。
- [3] 李增明、董琮、王辉源, 1983, 新疆维吾尔自治区哈密县磁海铁矿矿床地质特征。甘肃省地质局出版。
- [4] 刘德权、陈陶成, 1979, 新疆雅满苏铁矿床成矿控制因素及找矿方向的探讨。新疆地质, No. 6, 21—48。
- [5] 辽宁省地质局第二地质队, 1975, 辽宁黄岗梁砂卡岩型铁矿的成矿规律。铁铜矿产专辑, 第四集, 76—87。
- [6] Macdonald, G. A., 1972, *Volcanoes*, Englewood Cliffs, N. J., R. Prentice-Hall.
- [7] 李志鹤, 1980, 火山喷气热液的化学组成和铁在汽液中的性状。地质地球化学, 第一期。
- [8] Kennedy, G. C., 1950, P-V-T relations in at water at elevated temperatures and pressures, *Am. Journal of Sci.* Vol. 248, 558—564.
- [9] 梁祥济、程莱仙、廖婉萍、张桂兰, 1982, 福建马坑辉绿岩中铁的析出和铁矿形成的铁质来源的实验研究。中国地质科学院矿床地质研究所刊, 第1号, 181—196。

- 〔10〕 梁祥济、程菜仙、李德兴、张仲明, 1987, 交代岩与其有关矿床形成的铁质来源的模拟实验, 矿床地质, Vol.6, No.2, 63—76。
- 〔11〕 Liang Xiangji, 1986, Study on experiments of iron-bearing ore solution formed by interaction of containing potassium-sodium halogenide water with rock, Fifth international symposium on water-rock interaction, I. A. G. C.
- 〔12〕 梁祥济、程菜仙、曲国林, 1982, 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, No.3, 87—98。
- 〔13〕 Цзоцендзе, Г. С., 1965, Влияние вулканизма на образование осадков.
- 〔14〕 Овчиников, Л. И., 1980, О полигенности скарновых железорудных месторождений, Геология Рудных Месторождений, Том XXI, No.3, С.56—73.

Experimental Study on the Formation of Metasomatic Rocks and Related Iron Deposits in Volcanic Rock

Liang Xiangji, Qiao li

(Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037)

Key words: experimental study; volcanic gas-hydrothermal solution; subvolcanic-volcanic rocks; metasomatism; formation of metasomatic rocks and iron deposits

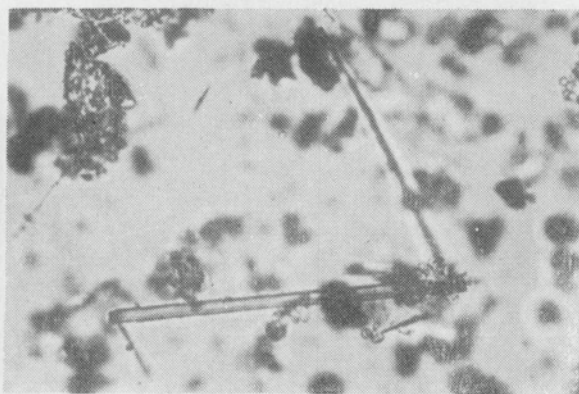
Abstract

The authors have made simulation experiments on the interactions of volcanic gas-hydrothermal solutions with subvolcanic-volcanic rocks (diabase, andesitic-tuff, andesite and tuffaceous sandstone) based on field observations of three iron ore deposits in volcanic rock areas of Cihai and Yamansu, Xinjiang and Huanggangliang, Inner Mongolia. The results of experiments has proved that paragenetic associations of the minerals of metasomatic rocks formed at 380—700°C temperatures and (250—800) × 0.1MPa pressures are similar to those in the aforementioned three iron ore deposits, are TFe = 11.89—3881.89mg/l is extracted from subvolcanic-volcanic rocks. It follows that metasomatism of the wall rocks of previously formed subvolcanic-volcanic rocks by late volcanic gas-hydrothermal solutions continuously rising along structural zones, led to the extraction of a great quantity of iron from these rocks and to the formation of the Cihai, Yamansu and Huanggangliang(western part) iron deposits under the favorable temperature, pressure, and other physico-chemical conditions.

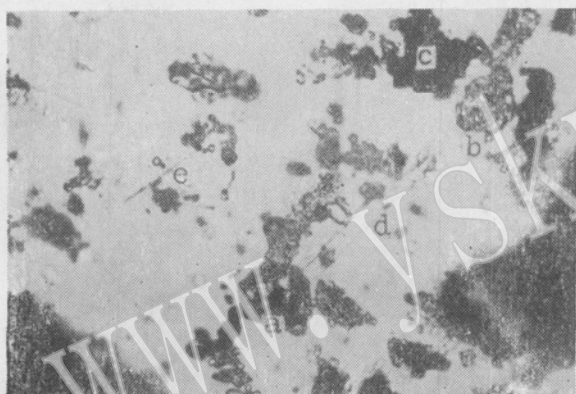
梁祥济：火山岩中交代岩和铁矿的实验研究



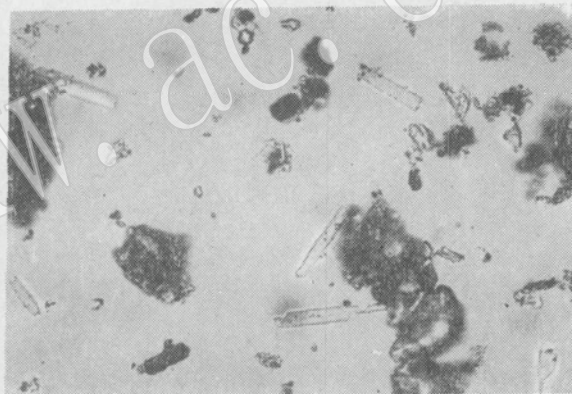
实验500, 油浸, 单偏光 ×600
a—透闪石; b—磁铁矿; c—硅灰石 (新疆 磁海)



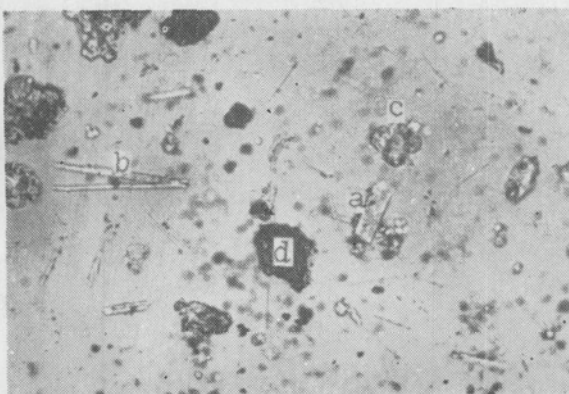
实验626, 油浸, 单偏光 ×600 针柱石
(长条状) (新疆 磁海)



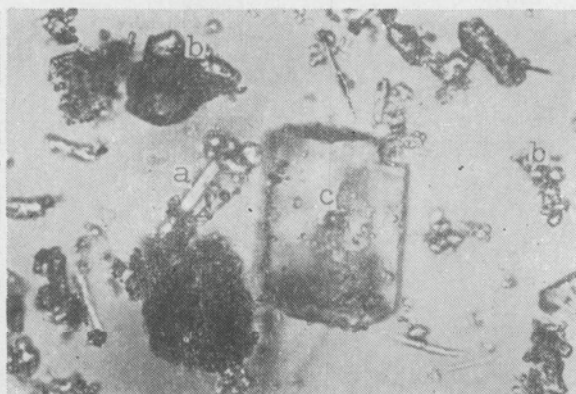
实验524, 油浸, 单偏光 ×700
a—钙铁榴石 (大); b—钙铁榴石 (小);
c—磁铁矿; d—透辉石; e—硅灰石
(新疆 雅满苏)



实验515, 油浸, 单偏光 ×480
硬石膏集合体 (短柱状)
(新疆 雅满苏)



实验527, 油浸, 单偏光 ×480
a—硬石膏; b—硅灰石; c—石榴石; d—磁
铁矿 (内蒙 黄岗梁)



实验518, 油浸, 单偏光 ×460
a—符山石; b—钙铁榴石; c—透辉石
(内蒙 黄岗梁)