

## 交代实验形成的硅镁石族矿物 特征和物理化学条件

梁祥济 乔 莉

(中国地质科学院地质研究所)

**主题词:** 交代实验; 硅镁石族矿物特征; 物理化学条件

**提 要:** 本文概括了1939—1988年以来硅镁石族矿物研究的进展; 叙述了以 橄辉岩和结晶石灰岩或黑云母石英片岩和白云质大理(或白云)岩作试料, 在450—700°C和 $(500—1400) \times 10^5 \text{ Pa}$  的温度和压力下的近中性卤素化合物水溶液中, 交代作用出现的硅镁石族矿物的特征; 探讨了它们形成时的物质组分及其活度, 反应溶液及其pH值, 氧化还原环境, 压力和温度等物理化学条件; 并用拓扑学的原理阐释了硅镁石族矿物和其最密切共生的矿物——镁橄榄石、水镁石和叶蛇纹石依赖于 $\mu_{\text{MgO}}$ 、 $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ 的变化和它们之间的内在联系; 揭示了硅镁石族矿物形成的机理。

自然界中出现的硅镁石族矿物有四个——块硅镁石、粒硅镁石、硅镁石和斜硅镁石。它们的结构、化学成分、光学性质和共生特点都十分相近, 所以该族矿物在矿物学上是晶变的最好例子。该族矿物原子排列结构与橄榄石的结构一样, 是由平行于(100)面的多层组成, 这些层状的变化与水镁石-氟镁石的成分 $\text{Mg}(\text{OH}, \text{F})_2$ 有关。该族矿物分子式的通式是:  $\text{Mg}(\text{OH}, \text{F})_2 \cdot n\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , 式中的n系数随着由块硅镁石向斜硅镁石变化从1递增至4。它们的单个矿物分子式分别为:

块硅镁石  $\text{Mg}(\text{OH}, \text{F})_2 \cdot \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , 粒硅镁石  $\text{Mg}(\text{OH}, \text{F})_2 \cdot 2\text{Mg}_2\text{SiO}_4$

硅镁石  $\text{Mg}(\text{OH}, \text{F})_2 \cdot 3\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , 斜硅镁石  $\text{Mg}(\text{OH}, \text{F})_2 \cdot 4\text{Mg}_2\text{SiO}_4$

而在我们的交代实验中出现了后三个, 即粒硅镁石、硅镁石和斜硅镁石。

与橄榄石的特征一样, 该族矿物中 $\text{Mg}^{+2}$ 和 $\text{Fe}^{+2}$ 离子交换常常是最少的, 但与橄榄石不同的是在一些粒硅镁石和斜硅镁石中常常出现了高钛量, 这些高钛量的硅镁石族矿物近年来作为判别地幔物质的一种标志。

硅镁石族矿物产出的地质环境范围很窄, 只出现在遭受变质作用和交代作用的石灰岩、白云岩内或碳酸盐岩与酸性甚至碱性侵入岩接触带中。这些矿物只在与含Fe、B和F交代作用明显的地区比较发育, 例如瑞典的诺尔别尔格<sup>(1)</sup>, 朝鲜的苏阿恩斯科姆, 奥克鲁格<sup>(2)</sup>, 苏联的乌拉尔南部<sup>(3)</sup>, 印度的巴恩达拉州<sup>(4)</sup>和中国黑龙江的孟家岗<sup>(5)</sup>等处都出现这些矿物组合。该族矿物常与镁橄榄石、钙镁橄榄石、水镁石、叶蛇纹石、磁铁矿、石榴石、硅灰石、枪晶石、氟硼镁石、硼镁铁矿和其它类型的矽卡岩矿物共生。近年来一些矿物学家对自然界出现的钛斜硅镁石和钛粒硅镁石给予极大的关注。因为这些含钛硅镁石族矿物主要在超镁铁岩石中发现, 其中一些可以作为地幔成因的证据。例如T. R. McGetchin<sup>(6)</sup>等记载了从科罗采来的金伯利岩中超镁铁质结核内发现了钛斜硅镁石, 推测了这个相能够代表一个重要的上地幔

贮存挥发分特别是水的地方。F. D. Robert<sup>[7]</sup>又发现了西部绿色大陆太古代片麻岩杂岩体中的一个蛇纹石基质内存在着钛粒硅镁石和钛斜硅镁石, 它们与橄榄石、菱镁矿、磁铁矿和 Ni-Co-Pb 硫化物共生。并讨论了钛硅镁石岩石的成因。

关于硅镁石族矿物形成机理前人做过一些实验研究。早在 1947 年 K. Rankama<sup>[8]</sup>用橄榄石和  $MgF_2$  混合物作为试料, 在一个大气压和 1620℃ 的温度下的干体系中加热了两个小时, 形成了硅镁石族矿物。接着 N. L. Bowen 和 O. F. Tuttle<sup>[9]</sup>试图在给定的温度和压力范围内, 通过  $SiO_2$ - $MgO$ - $H_2O$  体系的实验, 没有结晶出硅镁石族矿物。随后 N. Карпен<sup>[10]</sup>描述了在合成含氟金云母(001)面上有针状粒硅镁石和斜硅镁石的沉淀。不久 Л. А. Карякин 和 Н. В. Гулько<sup>[11]</sup>发现了在加热到 1250℃ 的坩埚壁上升华物中枪晶石和氟硅镁石<sup>①</sup>的连晶体。但在 1955 年 A. V. Van<sup>[12]</sup>试图用热液方法合成的硅镁石中部分的 F 离子置换 OH 的实验没有成功。近年来 E. Martin 和 H. L. Donald<sup>[13]</sup>用实验和热力学分析的方法研究了钛斜硅镁石的稳定性。但热液体系中形成硅镁石族矿物的实验资料甚少, 我们却在热液交代作用实验中出现了晶体很好的粒硅镁石、硅镁石和斜硅镁石, 它们与镁橄榄石、钙镁橄榄石、水镁石、叶蛇纹石、磁铁矿和石榴石等矽卡岩矿物共生。现将资料整理出来, 相信这对于研究硅镁石族矿物的矿物学有其理论意义和实际意义。

## 一、实验形成硅镁石族矿物的特征

我们以橄榄岩和石灰岩或黑云母石英片岩和白云质大理岩(或白云岩)作为实验试料, 在 450—700℃ 的温度和  $(500—1400) \times 10^5 Pa$  的压力范围内, 在近中性的 K、Na 卤化物水溶液中, 经过 120—168 小时的交代作用形成了粒硅镁石、硅镁石、斜硅镁石、镁橄榄石、钙镁橄榄石、水镁石、叶蛇纹石、磁铁矿和它们共生的钙铁榴石、透辉石、透闪石、硅灰石、方柱石、符山石等二十多种矽卡岩矿物。橄榄岩和石灰岩交代作用达到平衡时所产生的硅镁石族矿物和其共生矿物的颗粒太细, 只有几个  $\mu$  大, 无法用电子探针分析成分。现将它们的 X 光衍射谱线列于图 1。硅镁石族矿物和其共生矿物的光学特征用白光下的油浸法进行测定。浸油精度达  $\pm 0.0002$ , 显微镜下测定误差为  $\pm 0.0015—0.002$ 。对于硅镁石族矿物和它们主要共生矿物的主要光学特征分别简述如下:

(1) 粒硅镁石(Cho): 无色透明, 晶体为锥面与轴面聚形, 发育完好, 晶体大小约 0.002—0.01mm, 斜消光, 消光角  $\alpha \wedge Np = 27—31^\circ$ , 干涉色二级黄, 二轴晶正光性, 折光率  $Np = 1.610—1.618$ ,  $Ng = 1.643—1.652$  (照片 1)。

(2) 硅镁石(Hu): 无色透明, 假六方板状、粒状、晶形发育完善, 晶体大小约 0.0005—0.07mm, 一般为 0.01—0.02mm, 平行消光, 负延长, 干涉色一级灰至一级灰白色, 二轴晶正光性, 折光率  $Np = 1.604—1.622$ ,  $Ng = 1.639—1.654$  (照片 2)。

(3) 斜硅镁石(Chu): 无色—淡绿色色调, 透明, 晶体为各种晶面的聚形, 发育完整, 晶体大小约 0.0005—0.04mm, 一般为 0.005—0.02mm, 斜消光, 消光角  $\alpha \wedge Np = 7—15^\circ$ , 负延长, 干涉色为一级灰白色至一级灰黄色, 二轴晶正光性, 折光率  $Np = 1.640—1.652$ ,

① 氟硅镁石是指硅镁石( $Mg(OH, F)_3Mg_3SiO_4$ )中  $F \gg OH$  的硅镁石。

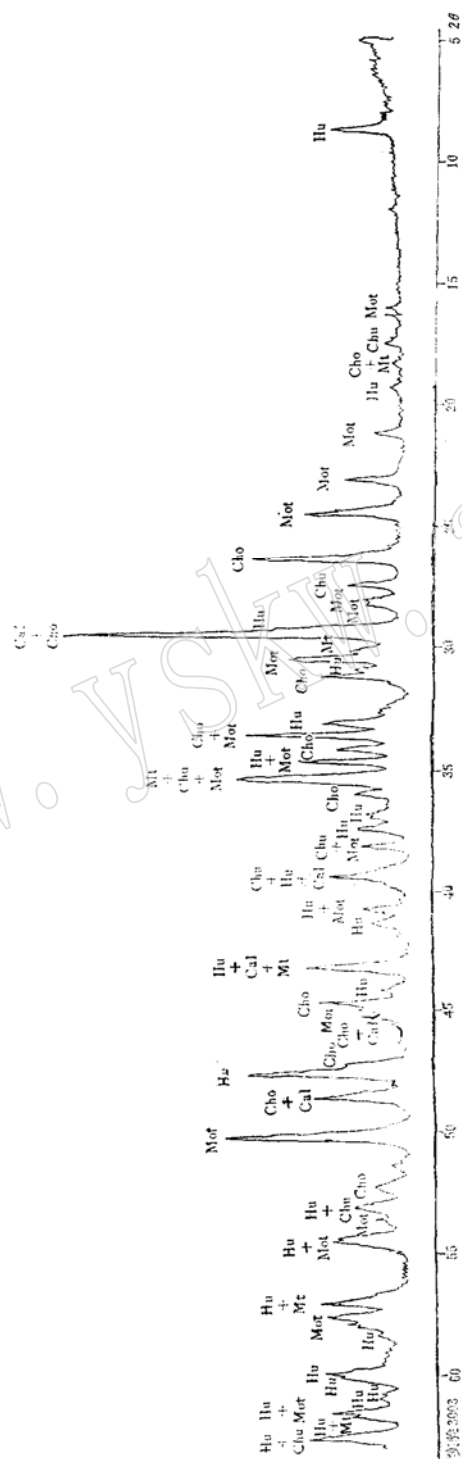


图 1 交代作用实验所产生的硅镁石族矿物和它的主要共生矿物 X 光衍射图

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of the humite group minerals and their main paragenetic minerals formed by metasomatic experiments

注：图中矿物代号Cal指方解石，它不是交代作用中形成的新产物，而是试料中的残留物。测试条件：CuK $\alpha$ ，50kV，40mA。

$N_g = 1.654-1.679$  (照片3)。

(4) 钙镁橄榄石 (Mot): 无色或带紫色色调, 柱状、短柱状、晶形发育良好, 晶体大小约  $0.002-0.04\text{mm}$ , 平行消光, 正延长, 干涉色为一级灰白至一级黄色, 二轴晶负光性, 折光率  $N_p = 1.643-1.658$ ,  $N_g = 1.652-1.667$  (照片4-a)。

(5) 镁橄榄石 (Fo): 无色透明, 晶形发育完好, 晶体大小约  $0.01-0.03\text{mm}$ , 平行消光, 干涉色为一级灰白色, 二轴晶正光性, 折光率  $N_p = 1.635-1.639$ ,  $N_g = 1.672-1.680$ 。

(6) 水镁石 (Bru): 无色透明, 通常呈纤维状集合体产出, 集合体大小约  $0.1-0.3\text{mm}$ , 单晶  $<0.0005\text{mm}$ , 平行消光, 正延长, 干涉色为一级橙黄色, 有的具有异常干涉色, 一轴晶正光性, 折光率  $N_o = 1.559-1.563$ ,  $N_e = 1.580-1.583$ 。有的水镁石仍保留方镁石三边、四边、六边和八边形的外形, 但它们已变为一轴晶, 折光率也降低在水镁石范围内。显然, 水镁石由方镁石变化而来。

(7) 叶蛇纹石 (Ang): 无色-淡黄绿色色调, 叶片状, 大小约  $0.0005-0.001\text{mm}$ , 平行消光, 正延长, 干涉色一级黄色, 二轴晶负光性, 折光率  $N_p = 1.558-1.560$ ,  $N_g = 1.567-1.574$ 。

(8) 磁铁矿 (Mt): 铁黑色, 大多呈半自形-自形, 油浸中常见立方体、其次为粒状, 八面体少见, 不透明, 大小约  $0.002-0.05\text{mm}$ , 具磁性, 反射色为钢灰色, 金属光泽, 均质, 无内反射。

实验产物中硅镁石族矿物粒硅镁石、硅镁石和斜硅镁石经常共生 (照片4), 它们的晶形似乎比较近似, 但仔细观察是有所区别的 (上面已叙述过), 但主要根据它们的折光率和消光角而定。实验产物中出现的粒硅镁石的量比硅镁石和斜硅镁石少, 但它们也常和钙镁橄榄石、镁橄榄石一起出现 (照片5), 它们还经常和钙铁榴石、磁铁矿等矽卡岩矿物共生 (照片6)。

## 二、硅镁石族矿物形成的物理化学条件

我们采用天然的橄辉岩和石灰岩 (橄辉岩由70%次透辉石、20%橄榄石和5—8%的钛磁铁矿及钛铁矿组成, 石灰岩的矿物成分主要是85%的方解石和15%的纤维蛇纹石<sup>[4]</sup>) 它们的岩石化学成分见表2) 作为试料, 在  $500-700^\circ\text{C}$  的温度和  $(500-1000) \times 10^5\text{Pa}$  的压力下, 在中性的  $0.5\text{MKCl} + 0.5\text{MNaF}$  水溶液中, 经过120—168小时的持续实验, 其结果见表2。

表1 实验样品化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental samples

| 样品名称 | 化学成分 (%) | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO                           | CaO                           | MgO             | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MnO   |
|------|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|-------|
| 橄辉岩  |          | 37.44            | 3.58                           | 7.08                           | 12.92                         | 13.36                         | 15.34           | 0.06             | 0.41              | 6.74             | 0.17  |
| 石灰岩  |          | 9.06             | 0.22                           | 0.19                           | 0.13                          | 41.61                         | 10.40           | 0.00             | 0.21              | 0.01             | 0.008 |
| 样品名称 | 化学成分 (%) | CuO              | ZnO                            | CO <sub>2</sub>                | H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> | H <sub>2</sub> O <sup>-</sup> | SO <sub>3</sub> | F                | Cl                | 总计               |       |
| 橄辉岩  |          | 0.63             | 0.30                           | 0.09                           | 0.60                          | 0.32                          | 0.17            | 0.25             | 0.03              | 99.49            |       |
| 石灰岩  |          | 0.11             | 0.054                          | 34.60                          | 2.90                          | 0.32                          | 0.17            | 0.23             | 0.04              | 100.26           |       |

分析者: 中国地质科学院岩矿测试技术研究所杨桂芳(1980)。

表2 橄辉岩和石灰岩在不同温度和压力下相互作用的实验固相产物\*

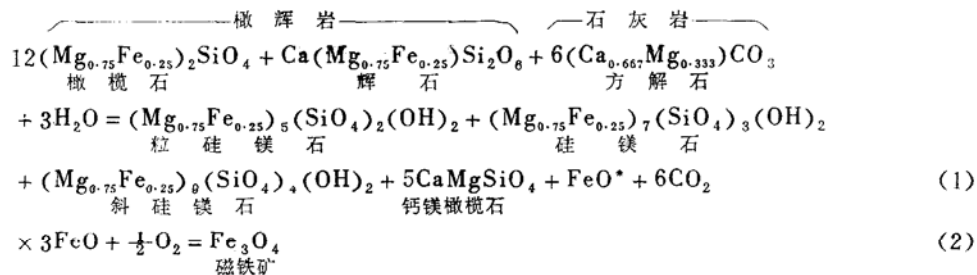
Table 2 Experimental solid products of the interaction between olivine pyroxenite and limestone under different temperatures and pressures

| 实验号<br>(No) | 实验温度<br>(°C) | 实验压力<br>(0.1MPa) | 实验后介质<br>pH值 | 实验持续<br>时间(h) | 新形成的固相产物**                     |
|-------------|--------------|------------------|--------------|---------------|--------------------------------|
| 705         | 525          | 950              | 9.0          | 168           | 硅镁石、钙镁橄榄石、斜硅镁石、水镁石、叶蛇纹石、磁铁矿    |
| 419         | 600          | 500              | 8.3          | 168           | 试料发生熔融,但未形成新矿物                 |
| 702         | 600          | 575              | 6.5          | 168           | 试料发生熔融,但未形成新矿物                 |
| 416         | 600          | 600              | 8.0          | 168           | 钙镁橄榄石、硅镁石、粒硅镁石、磁铁矿、金云母、透辉石、透闪石 |
| 704         | 600          | 700              | 8.0          | 168           | 钙镁橄榄石、硅镁石、磁铁矿、透辉石、透闪石          |
| 411         | 600          | 800              | 8.0          | 168           | 钙镁橄榄石、斜硅镁石、硅镁石、磁铁矿、水镁石、透闪石     |
| 420         | 600          | 1000             | 9.0          | 168           | 硅镁石、斜硅镁石、水镁石、叶蛇纹石、镁橄榄石         |
| 3002        | 620          | 800              | 9.0          | 120           | 斜硅镁石、粒硅镁石、透闪石、钙镁橄榄石            |
| 3003        | 620          | 900              | 8.7          | 120           | 斜硅镁石、粒硅镁石、硅镁石、钙镁橄榄石、磁铁矿        |
| 3005        | 620          | 1000             | 7.0          | 120           | 硅镁石、斜硅镁石、粒硅镁石、钙镁橄榄石、磁铁矿        |
| 3001        | 630          | 700              | 7.3          | 120           | 硅镁石、粒硅镁石、钙镁橄榄石、斜硅镁石、钙铁榴石       |
| 422         | 650          | 700              | 9.0          | 168           | 硅镁石、粒硅镁石、钙镁橄榄石、斜硅镁石、磁铁矿        |
| 3004        | 670          | 500              | 9.0          | 120           | 斜硅镁石、钙铁榴石、透辉石、磁铁矿              |
| 3008        | 680          | 500              | 9.0          | 120           | 硅镁石、斜硅镁石、粒硅镁石、钙镁橄榄石、磁铁矿        |
| 3007        | 700          | 600              | 9.0          | 120           | 粒硅镁石、硅镁石、斜硅镁石、钙镁橄榄石、磁铁矿        |
| 411         | 700          | 800              | 9.0          | 168           | 钙镁橄榄石、斜硅镁石、硅镁石、磁铁矿、粒硅镁石        |
| 3006        | 700          | 900              | 9.0          | 120           | 斜硅镁石、硅镁石、磁铁矿、粒硅镁石、钙镁橄榄石        |

\* 实验试样称重: 橄辉岩60mg, 石灰岩60mg; 实验介质水溶液化学成分: 0.5MKCl+0.5MNaF; 实验介质pH=6.0.

\*\* 表中该栏内矿物相对含量前者为多, 往后依次递减, 后者最少.

根据实验判断, 表2中只有实验3003、3005、422、3008、3007、411和3006的反应达到平衡, 其余的实验所形成的矿物共生组合系准稳定的过渡性的产物. 达到平衡时的反应式可能是:



(2)

根据表2中反应达到平衡的温度和压力数据作硅镁石族矿物的  $P$ - $T$  图 (图2). 同样, 我们用黑云母石英片岩和白云质大理岩在450—550℃的温度和  $(600-1400) \times 10^5 \text{Pa}$  的压力下, 在  $\text{pH} = 7.5$  的  $1\text{MNaHCO}_3 + 0.2\text{MKF}$  水溶液中, 经过168小时的实验, 形成了以斜硅镁石为主

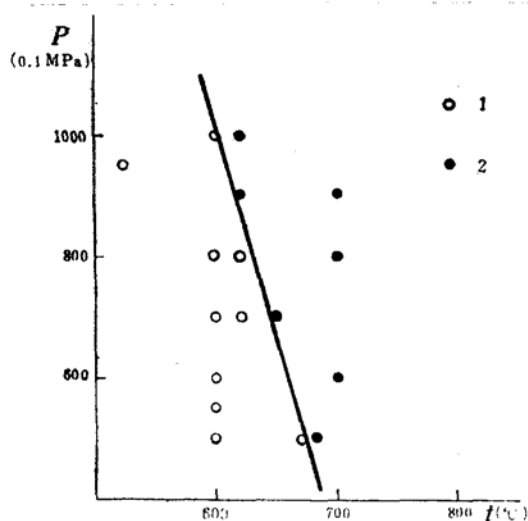


图2 实验形成的硅镁石族矿物P-T图

Fig.2 P-T diagram of the experimentally-formed humite group minerals

1—未形成新矿物和未达到平衡时的实验产物

2—达到平衡时的实验产物

(注: 图中P应为 $P_{H_2O}$ )

的和镁橄榄石、水镁石、叶蛇纹石共生的稳定矿物组合。

下面我们应用实验资料对交代作用形成的硅镁石族矿物进行简要的物理化学分析并前人成果进行对比。

### 1. 物质组分和活度

物质组分中含有一定量的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 是形成硅镁石族矿物的决定因素。例如橄辉岩和石灰岩或黑云母石英片岩和白云质大理岩在适宜的温度和压力下的反应溶液中相互作用都能形成硅镁石族矿物。反之在同样的条件下黑云石英片岩和石灰岩相互交代则不能形成硅镁石族的矿物, 也就是说反应溶液中要有一定量 $\text{Si}^{+4}$ 和 $\text{Mg}^{+2}$ 的活度。实验证明了形成硅镁石族矿物时岩石物质组分中必须含有10% (重量) 以上的 $\text{SiO}_2$ 和30% (重量) 以上的 $\text{MgO}$ 和足够的 $\text{H}_2\text{O}$ 。在饱和

水溶液中Mg和Si的摩尔比值大约是3:1 (1.25:0.43) 以上。

### 2. 反应溶液成分及其pH值和氧化还原环境

在具备产生硅镁石族矿物的物质组分和温度、压力条件下, 反应溶液的成分、pH和氧化还原环境是形成硅镁石族矿物的关键性的因素。例如, 把橄辉岩60mg和石灰岩60mg作为试料, 在600℃和 $800 \times 10^5 \text{Pa}$ 的温度和压力下, 在不同成分和pH的反应溶液中, 经过168小时的持续实验, 其结果 (见表3) 表明了只有在 $\text{pH} = 6.0-8.0$ 的 $0.5\text{MKCl} + 0.5\text{MNaF}$ 的反应溶液中才能形成硅镁石族矿物。虽然, 反应产物为准稳定, 但已足够说明该条件有利于它们的生长。

表3 反应溶液对硅镁石族矿物形成的影响

Table 3 The influence of reactive solution upon the formation of humite group minerals

| 实验号<br>(No) | 实验时介<br>质pH值 | 实验后介<br>质pH值 | 实验介质的成分                                                       | 新形成固相产物                        | 备注   |
|-------------|--------------|--------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|------|
| 417         | 4.5          | 7.0          | 0.5MKCl+0.5MNaF+几滴<br>( $\text{H}_2\text{S} + \text{HF}$ )水溶液 | 透闪石、硅灰石、钙镁橄榄石<br>(?), 斜硅镁石(?)  | 量都很少 |
| 403         | 6.0          | 8.5          | 蒸 馏 水                                                         | 方解石发生溶蚀, 未形成新矿物                |      |
| 411         | 6.0          | 8.0          | 0.5MKCl+0.5MNaF水溶液                                            | 钙镁橄榄石、斜硅镁石、硅镁<br>石、磁铁矿、水镁石、透闪石 | 量 多  |
| 413         | 8.0          | 8.0          | 0.5MKCl+0.5MNaF+6滴0.05<br>M( $\text{NaOH} + \text{KOH}$ )水溶液  | 斜硅镁石、硅镁石、水镁石                   | 量都很少 |

用黑云母石英片岩和白云质大理岩作试料时, 必需加入一定量的 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 才能形成硅镁石族矿物 (以橄辉岩和石灰岩作试料, 则不需加入 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 因为橄辉岩中已含有较高的 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。

( $\epsilon = 7.08\%$ )。同时, 实验形成的硅镁石族矿物经常和磁铁矿紧密共生, 而且和磁铁矿共生的这些矿物, 晶形发育完善, 量多, 晶体也大些。由此可见,  $f_{\text{H}_2\text{O}}$  比较高的环境对硅镁石族矿物形成最有利。

### 3. 温度和压力

在其他条件具备时, 温度和压力是导致硅镁石族矿物形成的主要条件。从表2可以看出525℃的温度和 $500 \times 10^5 \text{Pa}$ 压力以上才有可能出现硅镁石族矿物。图2上达到平衡的反应线是较陡的负斜率, 说明温度对硅镁石族矿物形成起了主导作用, 而硅镁石族矿物对压力适应的范围比较广。不过压力对它们晶体的大小有所影响(表4)。

表4 斜硅镁石晶体大小随实验压力和实验后反应溶液pH值的变化

Table 4 The variation in the size of clinohumite crystals with experimental pressures and post-experiment pH of the reactive solution

| 实验号<br>(No) | 试剂组分<br>(mg)     | 实验温度<br>( $T^\circ\text{C}$ ) | 实验压力<br>( $P=10^5 \text{Pa}$ ) | 反应溶液 pH |     | 晶体大小<br>(mm) | 相对含量* |
|-------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|-----|--------------|-------|
|             |                  |                               |                                | 实验时     | 实验后 |              |       |
| 411         | 橄辉岩 60<br>石灰岩 60 | 600                           | 800                            | 6.0     | 8.0 | 0.001—0.005  | 较多    |
| 3003        | 橄辉岩 60<br>石灰岩 60 | 620                           | 900                            | 6.0     | 8.7 | 0.005—0.02   | 多     |
| 420         | 橄辉岩 60<br>石灰岩 60 | 600                           | 1000                           | 6.0     | 9.0 | 0.02—0.04    | 很少    |

\* 相对含量从少到多分别为偶见、很少、中等、较多、多。

表4反映了斜硅镁石随着实验压力增加和实验后的反应溶液pH值增大, 其晶体有随之增大的趋势。同样, 硅镁石和粒硅镁石也有类似的特征。

### 4. 与前人实验结果对比

我们把反应达到平衡时, 形成硅镁石族矿物的温度和压力的数据代入 E. Martin 和 H. L. Donald<sup>(13)</sup> 的形成稳定钛斜硅镁石的计算公式 (3) 进行计算,

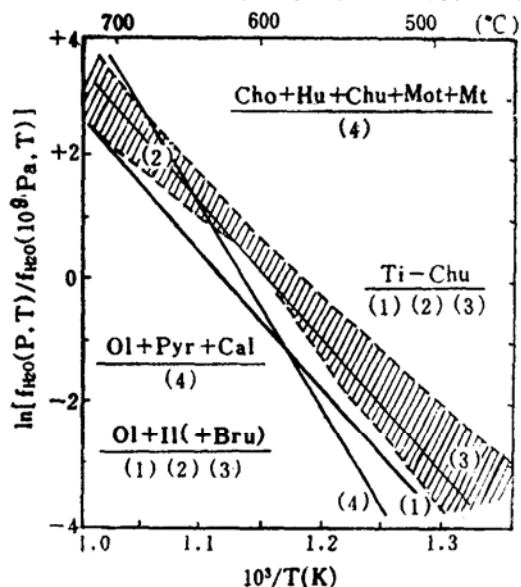


图3 硅镁石族矿物形成的稳定平衡图

Fig. 3 Stable equilibrium diagram of the formation for humite group minerals

(根据 E. Martin and H. L. Donald, 1980)

- (1) 纯Mg体系计算的平衡线(E. Martin etc., 1980);
- (2)  $X_{\text{Mg}}^{\text{Ti-C}} = 0.884$ 计算的平衡线(E. Martin etc., 1980);
- (3) E. Martin and H. L. Donald 的实验平衡区(1980);
- (4) 本文作者实验的平衡线(1989)

$$\ln(f_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{实验}}/f_{\text{H}_2\text{O}}^{10^8\text{Pa}}) = \frac{-21746}{T(K)} + 24.521 + \frac{61.2(10 - P/10^8\text{Pa})}{T(K)} \quad (3)$$

将结果投入硅镁石族矿物形成的稳定平衡图(图3)上近似地进行对比。图3上清楚地反映出我们实验的平衡线(4)虽然斜率略陡一点,但总体来说与前人的结果基本上相一致。

### 三、硅镁石族矿物的共生组合和它们的拓朴学

上节已叙述过黑云母石英片岩和白云质大理岩相互作用产生了以斜硅镁石为主的硅镁石族矿物和镁橄榄石、水镁石、叶蛇纹石稳定的共生组合。通过这四个矿物化学成分分析:

斜硅镁石:  $\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \longrightarrow 9\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

镁橄榄石:  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \longrightarrow 2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$

水镁石:  $\text{Mg}(\text{OH})_2 \longrightarrow \text{MgO} \cdot \text{H}_2\text{O}$

叶蛇纹石:  $\text{Mg}_3(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5 \longrightarrow 3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

实际上它们是属于  $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  的三组分体系。斜硅镁石是镁橄榄石和水镁石合二为一的矿物,暂不考虑,则稳定的共生矿物组合最大相数为3,独立组分也是3,符合矿物相律( $P \leq C$ )。因此,作以  $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  为端员的三组分的矿物共生图解<sup>[15]</sup>,并在三角形边上和当中画出了镁橄榄石(Fo)、水镁石(Bru)和叶蛇纹石(Ang)成分点。把这些成分点相连,再把斜硅镁石(Chu)的成分按比例放在Fo和Bru的连线上,最后把各矿物对角线相交,形成了Fo、Bru、Ang和Chu之间的相互反应关系(图4)。

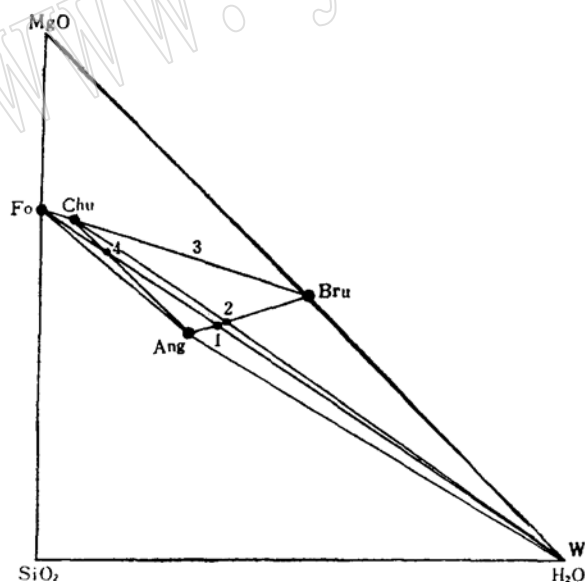


图4 实验所产生的Fo、Bru、Ang和Chu之间相互反应关系

Fig. 4 Reactive relations among experimentally-formed Fo, Bru, Ang and Chu

根据 Schreinemakers 的法则,这种相互之间反应关系可用拓朴学图解来表示。如果从  $\text{H}_2\text{O}$  的角度投影,则独立组分数为2( $C=2$ ),相数为4( $\varphi=4$ ),代入吉布斯相律公式

$$G = C + 2 - \varphi = 2 + 2 - 4 = 0$$

则具有一个不变点。图4中1、2、4三个交点和一条反应线3代表了四个单变反应。采用“(矿物消失)”如(Chu)方法写出了下列四个单变反应式,并计算出它们的 $\alpha$ 角。

1. (Chu):  $\text{Bru} + \text{Ang} = 2\text{Fo} + 3\text{W}$   
(W - Water)  $\alpha = 7^\circ 38'$
2. (Fo):  $3\text{Bru} + 2\text{Ang} = \text{Chu} + 6\text{W}$   
 $\alpha = 90^\circ$
3. (Ang, W):  $\text{Bru} + 4\text{Fo} = \text{Chu}$   
 $\alpha = 0^\circ$
4. (Bru):  $6\text{Fo} + 3\text{W} = \text{Chu} + \text{Ang}$   
 $\alpha = 26^\circ 34'$

Fe靠近于MgO端员, 把它近似地看成MgO, 同时把  $\text{SiO}_2$  看作相对惰性组分, 把 MgO 和  $\text{H}_2\text{O}$  看作相对活动组分, 作  $\text{SiO}_2$ -MgO- $\text{H}_2\text{O}$  三组分依赖于  $\mu_{\text{MgO}}-\mu_{\text{H}_2\text{O}}$  变化的拓扑学图 (图5)。从图5可以看出具有一定MgO的化学位和饱和  $\text{H}_2\text{O}$  有利于斜硅镁石 (硅镁石族矿物) 的形成和其共生矿物——镁橄榄石、水镁石和叶蛇纹石对MgO和  $\text{H}_2\text{O}$  的化学位的不同要求及它们之间有规律的变化。

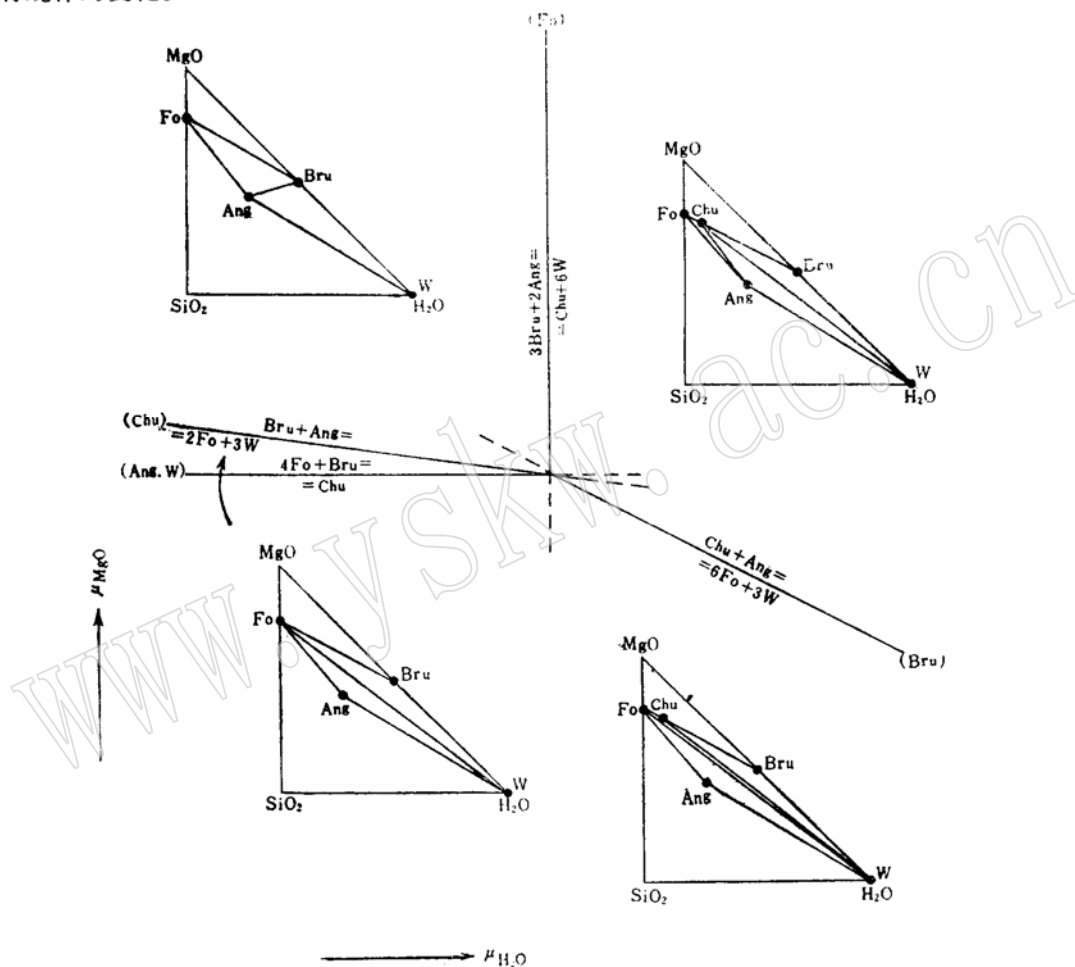


图5  $\text{SiO}_2$ -MgO- $\text{H}_2\text{O}$ 三组分依赖于  $\mu_{\text{MgO}}-\mu_{\text{H}_2\text{O}}$  的矿物共生拓扑学图

Fig. 5 Topologic diagram of mineral paragenesis showing the dependence of three components of  $\text{SiO}_2$ -MgO- $\text{H}_2\text{O}$  upon  $\mu_{\text{MgO}}-\mu_{\text{H}_2\text{O}}$

#### 四、结 论

通过实验研究和矿物共生组合分析, 得到下列几点认识:

(1) 硅镁石族矿物是以橄榄岩与石灰岩和黑云母石英片岩与白云质大理岩, 在450—700℃的温度和  $(500-1400) \times 10^5 \text{Pa}$  的压力下,  $\text{pH} = 6.0-8.0$  的0.5MKCl + 0.5MNaF水溶液中相互作用而产生。由此可见超基性-基性岩与碳酸盐岩或硅质岩与含Mg高的碳酸盐岩在适宜的

温度和压力下的中性卤化物溶液中进行交代作用，都可以形成该族矿物。

(2) 交代形成的硅镁石族矿物，无色—浅黄色色调，透明，晶形发育完善，晶体大小一般为0.005—0.02mm，二轴正光性。但它们不同的特征是：粒硅镁石，干涉色为二级黄色，消光角 $\alpha \wedge Np = 27-31^\circ$ ，折光率 $Np = 1.610-1.618$ ， $Ng = 1.643-1.652$ ；硅镁石，干涉色一级灰—灰白色，平行消光，折光率 $Np = 1.604-1.622$ ， $Ng = 1.639-1.654$ ；斜硅镁石，干涉色为一级灰白—灰黄色，消光角 $\alpha \wedge Np = 7-15^\circ$ ，折光率 $Np = 1.640-1.652$ ， $Ng = 1.654-1.679$ 。

(3) 硅镁石族矿物形成的根本条件是物质组分中Mg和Si的摩尔数之比必须大于3:1，并含有饱和 $H_2O$ 。在适宜的温度和压力下，中性—弱碱性K、Na卤化物水溶液和氧化环境有利于它们的生长和发育。

(4) 硅镁石族矿物和它们的主要共生矿物——斜硅镁石和镁橄榄石、水镁石、叶蛇纹石进行共生组合分析，阐明了它们实际上属于 $SiO_2-MgO-H_2O$ 三组分体系。这四个矿物共生组合依赖于 $\mu_{MgO}$ 和 $\mu_{H_2O}$ 的拓扑学图说明了 $SiO_2$ 化学位一定时，较高的 $MgO$ 化学位和饱和 $H_2O$ 有利于硅镁石族矿物的形成。同时也证明了这四个共生矿物在相互反应中是内协合的。

(5) 硅镁石族矿物是热液交代中的镁矽卡岩标型矿物，它们只在Fe、Mg、B、F交代作用发育的地区出现。所以它们可以作为寻找硼镁铁矿、氟硼镁石、蛇纹石和磁铁矿等矿产的找矿标志。如果硅镁石族矿物中含有钛(Ti)，而且在超铁镁岩石中出现，可以认为它们的母岩来自下地壳或上地幔。

在作矿物X光分析时，得到黄家山高级工程师的帮助，张德全工程师对本文提出宝贵的意见，在此一并表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] Geijer, P., 1939. The paragenesis of Ludwigite in Swedish iron ores. Geol. Fören. Stockholm, Förh. 61, p. 19.
- [2] Watanabe, T., 1943. Geology and Mineralization of the Suian District, Tyosen (Korea). The Geology of the Suian goldmining district, Journ. Fac. Sci. Hokkaido Imp., Ser. 4, v. 6, p. 205.
- [3] Борнеман—Старинкевич Н. Д. Мясников, В. С., 1950. Об изоморфных замещениях в клинхумите. Докл. АН СССР, Том. 71, с. 137.
- [4] Muthuswami, T. N., 1958. Clinohumite, Sausar series, Bhandara District, India, Proc. Indian Acad. Sci., v. 48, A, p. 9.
- [5] 梁祥济和乔莉, 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, p. 159.
- [6] McGetchin, T. R., Silver, L. T., and Chodos, A. A., 1970. Titanoclinohumite: A possible mineralogical Site for water in the upper mantle. Journal of geophysical Research, v. 75, p. 255.
- [7] Robert, F. D., 1988. Titanian chondrodite and titanian clinohumitebearing metadunite from the 3800Ma Isua supracrustal belt, West Greenland: Chemistry, petrology and Origin. Am. Mineral. v. 73, p. 547.
- [8] Rankama, K., 1947. Synthesis of norbergite and chondrodite by direct dry fusion. Am. Mineral. v. 32, p. 146.
- [9] Bowen, N. L., and Tuttle O. F., 1949. The system  $MgO-SiO_2-H_2O$ . Bull. Geol. Soc. Am., v. 60, p. 439.
- [10] Köppen, N., 1951. Gesetzmässige Verwachsung von synthetisch phlogopit mit mineralien der

Humitgruppe, Neues Jahrb. Min. Geol., Abhandl., Abt., A, v. 80, p. 343.

[11] Карякин, Л. И., 1954. Кренизису хуспидина и минералов группы гумита, Докл. АН СССР, том. 96, с. 581.

[12] Van Valkenburg A., 1955. Synthesis of the humites, Am. Mineral. v. 40, p. 621.

[13] Martin, E., and Donald H. L., 1980. Stability of titanian clinohumite and thermodynamic analysis, Contrib. Mineral. Petrol. v. 72, p. 415.

[14] 梁祥济等, 1986, 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, 第15号, p. 166.

[15] 梁祥济、缪婉萍等, 1981, 福建马坑矽卡岩分带的模拟实验. 长春地质学院学报, no. 2, p. 11.

## Characteristics of Humite Group Minerals Formed in Metasomatic Experimentation and Physico-chemical Conditions for Their Formation

Liang Xiangji Qiao Li

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences)

Key words: metasomatic experiment; characteristics of humite group minerals; physico-chemical condition

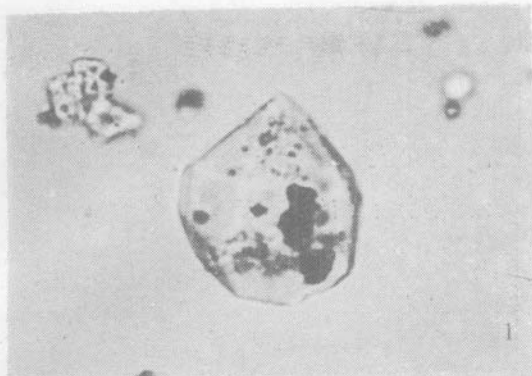
### Abstract

Using natural olivine pyroxenite and crystalline limestone or biotite-quartz schist and dolomitic marble as starting materials, the authors performed metasomatic experimentation in 0.5M KCl + 0.5M NaF solution with pH 6.0–8.0 at 450–700°C and under  $(500-1400) \times 10^5$  Pa; as a result, humite group minerals were formed.

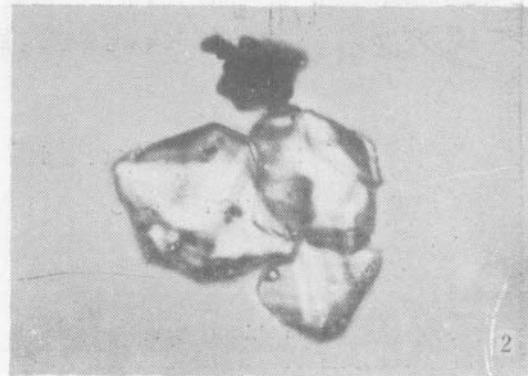
Humite group minerals formed by metasomatism are colorless (some with light yellow tone) and transparent. Crystal morphology is perfectly developed with crystal sizes being generally 0.005–0.02mm; biaxial positive. Their optical properties such as refractive indices and their X-ray diffraction patterns indicate that they are chondrodite, humite and clinohumite.

The principal conditions for the formation of humite group materials are that the mole number ratio between Mg and Si must be higher than 3:1 in the starting materials which, in addition, should contain saturated H<sub>2</sub>O. Under suitable temperature and pressure, neutral-weakly alkaline solution of K, Na halogenides and oxidation environment are favorable for their growth and development.

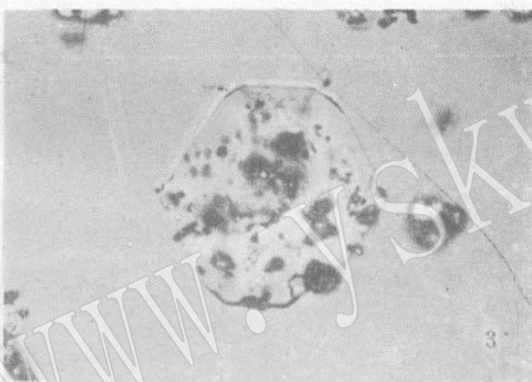
With topologic graphical method, the authors have reached the conclusion that, at constant chemical potential of SiO<sub>2</sub>, the formation of clinohumite (one of the humite group minerals) and its major paragenetic minerals—forsterite, brucite and antigorite is dependent on fairly high  $\mu_{\text{MgO}}$  and  $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ . It is also proved that the coexistence of these minerals is an inherent law in their interaction.



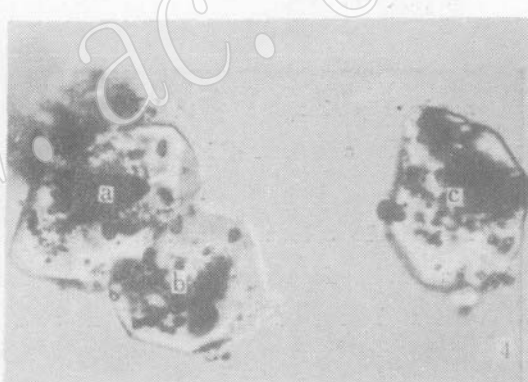
照片 1. 实验3003, 粒硅镁石单体  
油浸 单偏光  $\times 1700$ .



照片 2. 实验575, 硅镁石集合体  
油浸 单偏光  $\times 800$



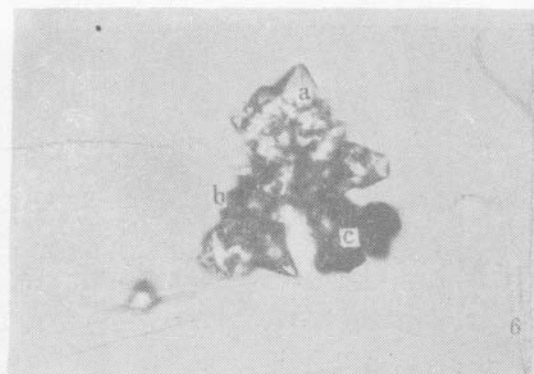
照片 3. 实验420, 斜硅镁石  
油浸 单偏光  $\times 1700$



照片 4. 实验3003, 粒硅镁石(a)、斜硅镁石(b)和硅镁石(c)集合体 油浸  
单偏光  $\times 1700$



照片 5. 实验412, 钙镁橄榄石(a)、粒硅镁石(b)、硅镁石(c)和斜硅镁石(d)  
集合体 油浸 单偏光  $\times 1700$ .



照片 6. 实验572, 硅镁石(a)、钙铁榴石(b)和磁铁矿(c)集合体 油浸 单偏光  
 $\times 800$