

矿物组合的热力学分析

王 书 凤

(中国地质科学院矿床地质研究所)

人们在对地质体进行物质成份研究的实践中早已认识到, 矿物作为地质体的较小单元, 是按共生组合的形式规律性地存在于岩石及矿石里。某种矿物, 在类型不同成分互异的地质体中有不同的组合; 在不同地区而类型相同的地质产物里, 与之组合的矿物差别很大, 所构成的共生组合多种多样; 即使在同一矿床, 对于不同世代的该矿物来说, 与之组合的矿物也存在明显的差异。人们惊奇地注视着矿物组合如此这般的变幻关系, 不易悟出要领。

从物理化学角度看, 矿物只不过是热力学体系在平衡状态下的一个相; 矿物组合是多组份体系在平衡状态下的相组合。后者依自由度数的不同, 又分为零变组合、单变组合、双变组合^[1]。吉布斯(J. W. Gibbs)相律的问世, 使矿物学家得到了理解矿物规律性共生的钥匙。施赖恩马克思(F. A. H. Scheinemarkers)图示法^[1]的创立, 提供了揭示矿物组合依体系强度参数而变的得力工具, 开辟了对矿物组合进行全面研究的正确途径。

戈尔德斯米特、尼格里、柯尔任斯基等, 是用相律及其施赖恩马克思图示法探索矿物组合对体系强度参数变化具有依从关系的先驱者。尔后的许多地质学家在这个方向上又作了创造性的研究, 提供了更多的实例。其中有些是研究区域岩石在矿物组合上

的规律性递变; 有些着眼于个别矿床某类岩石形成的物理化学条件; 有些则致力于探索同一种矿物何以在不同矿床有不同的共生组合^[2]。

本文在上述认识的基础上, 从矿物共生组合依体系强度参数而变的特定侧面, 分析大顶地区镁矽卡岩钙质交代产物的若干特征。

一、镁矽卡岩钙质交代产物的主要矿物组合

所谓镁矽卡岩的钙质交代作用, 就是指镁矽卡岩在体系强度参数变化的过程中, 由于与热液组份不断发生物质交换而诱发出的一系列地球化学反应。其结果, 在热液作用所及的地段, 镁矽卡岩的固有矿物镁尖晶石、镁橄榄石、深绿辉石, 在热液组份的参与下, 以相互反应的方式转化成富钙的矿物: 钙镁橄榄石、碳硼硅钙镁石、符山石、钙铝石榴石、钙铝黄长石、次透辉石—普通辉石、榍石、磷灰石、方解石, 有时还析出有磁铁矿。下面概略地叙述前六种矿物的形成途径及共生组合。

次透辉石—普通辉石 过去, 在谈到矽卡岩中的单斜辉石时, 几乎都不加区别把它说成是透辉石—钙铁辉石。十多年前, 有些国外学者指出, 矽卡岩中不仅存在透辉石—钙铁辉石, 而且还见到透辉石(次透辉石)

—普通辉石^[3]。前者仅存于外带钙矽卡岩，以交代灰岩的方式生成。后者的形成途径，比较复杂。

透辉石（次透辉石）—普通辉石分布在内带钙矽卡岩，更多的则是发育在钙质交代改造很强烈的镁矽卡岩中。在前一情况下，它是交代内接触带花岗岩类岩石。在后一场合里，则是镁矽卡岩钙质交代的产物，实际上是由镁矽卡岩矿物演变而来的。这样的辉石，在化学成份及某些光学性质上，既不同于镁矽卡岩的深绿辉石，也与外带钙矽卡岩的透辉石—钙铁辉石存在较大的区别^[4]。

次透辉石—普通辉石，多半形成在镁矽卡岩原先的位置上，是深绿辉石在镁矽卡岩钙质交代过程中为适应外部条件变化，在不改变辉石固有晶格的前提下，部份脱铝、脱镁，代之以铁质组份并重新结晶的结果。它主要存在于辉石石榴石矽卡岩和辉石符山石矽卡岩中；其它岩石里也较常见，有时可形成不规则状或脉状的单矿物堆积体。这种辉石的粒径参差不齐，细者不到1毫米，粗者达1厘米以上，即使在同一块标本或同一视域内也是如此（图版1照片1）。其颜色深浅各异，有的淡绿、有的浅绿，有的深绿。与此相对应，晶格中呈类质同像替换的那些化学组份，存在一个很大的变化区间。与次透辉石—普通辉石共生的矿物很多，主要为符山石、石榴石、钙镁橄榄石、碳硼硅钙镁石、钙铝黄长石及其它矿物，与之对应，存在各种各样的矿物组合。

碳硼硅钙镁石是一种罕见矿物^[4]。它在这里主要堆积在小藤石大理岩与镁尖晶石镁橄榄石矽卡岩的界面附近，并由此向两侧扩展。在这两种岩石的界面处，该矿物形成的示性反应式为：小藤石 + 镁尖晶石 + 镁橄榄石 + 方解石 → 碳硼硅钙镁石 + \uparrow MgO \downarrow 。在小藤石大理岩那一侧，它是方解石、小藤石与热液组份相互反应的产物，往往造成单

矿物堆积体。在另一侧，它的形成取决于镁尖晶石、镁橄榄石、方解石与热液组份的相互反应，直至镁尖晶石完全消失为止；未被交代的镁橄榄石随之转化为粒硅镁石。

碳硼硅钙镁石也可以出现在镁尖晶石辉石镁橄榄石矽卡岩里。在这种情况下，它往往沿原岩的裂隙分布，是在含硼溶液的参加下，由镁尖晶石、深绿辉石、镁橄榄石、方解石相互起反应而成，直至硼的活度变化到不适于它继续沉淀为止。未被交代的深绿辉石演化成为次透辉石—普通辉石，并已发生明显的重结晶现象。所形成的共生组合，主要为碳硼硅钙镁石 + 钙镁橄榄石（图版1照片2），碳硼硅钙镁石 + 次透辉石—普通辉石（图版1照片3），偶尔见到碳硼硅钙镁石 + 符山石 + 次透辉石—普通辉石，石榴石 + 次透辉石—普通辉石 + 碳硼硅钙镁石，等等。

钙镁橄榄石，基本上形成在镁橄榄石斑花大理岩与镁尖晶石镁橄榄石矽卡岩界面的有利地段，有时也见于镁尖晶石辉石镁橄榄石矽卡岩的裂隙附近。其形成主要与热液中CO₂活度的下降有关。导致该矿物沉淀的地球化学反应及与之组合的矿物因介质不同而异。在镁橄榄石斑花大理岩的位置上，钙镁橄榄石的沉淀始于镁橄榄石与方解石的粒间空隙，以两者的消逝为代价，结果往往造成单矿物堆积体，偶尔可见硅镁石类矿物与之共生。成于镁尖晶石镁橄榄石矽卡岩的钙镁橄榄石，它的沉淀发生在镁橄榄石与方解石的颗粒之间，是二者相互反应的结果，反应一直持续到CO₂活度不宜于该矿物的形成为止。原岩的初始矿物镁尖晶石呈呆性行为，但含量有些减少。沿镁尖晶石辉石镁橄榄石矽卡岩裂隙分布的钙镁橄榄石，是镁橄榄石、深绿辉石、方解石三者间反应的产物。原岩的镁尖晶石未参加反应，是呆性矿物。未被交代的深绿辉石随之演化为次透辉石—普通辉石，粒径明显变粗。该矿物的共生组

合较多,除钙镁橄榄石+碳硼硅钙镁石外,主要有钙镁橄榄石+次透辉石—普通辉石(图版1照片4),钙镁橄榄石+石榴石+次透辉石—普通辉石,等等。

符山石,过去一直被当作钙矽卡岩的固有矿物。实际上,它在多数场合皆为镁矽卡岩的钙质交代产物⁽²⁾。该矿物基本上发育在镁尖晶石辉石矽卡岩的有利地段,它的沉淀始于深绿辉石与镁尖晶石的粒间空隙,以两者的不断分解为代价,直至镁尖晶石完全消失。未被交代的深绿辉石,有的呈原状裹在符山石体内,有的发生明显的重新结晶。这样一来,初始组合的镁尖晶石+深绿辉石,而今代之以符山石+次透辉石—普通辉石。当然,符山石也可形成在别的岩石里,其形成途径大体类似。但与之组合的矿物却较为复杂,所造成的共生组合主要有符山石+石榴石+次透辉石—普通辉石(图版1照片5),符山石+钙镁橄榄石+次透辉石—普通辉石,碳硼硅钙镁石+符山石+辉石等。

钙铝黄长石在这里的分布相当有限,仅见于镁尖晶石辉石矽卡岩的个别部位,多呈窝状堆积。该矿物的发育始于镁尖晶石与深绿辉石的颗粒之间,是这两种矿物在溶液中镁、硅活度降低的条件下相互作用的结果。直至上述组份的活度变化到阻碍它继续沉淀为止。未被交代的镁尖晶石和深绿辉石都有明显的重结晶现象,在成份上皆变得较富含铁质组份。因此,钙铝黄长石,既可以与镁尖晶石,又可以与次透辉石—普通辉石构成稳定的共生关系(图版1照片6)。

钙铝石榴石,主要形成在镁尖晶石辉石矽卡岩所在位置的范围内,以交代镁尖晶石和深绿辉石的方式生成。究其机理在于,上述两种矿物在溶液中镁、硅活度降低的过程中变得不稳定,由镁尖晶石分解释放出来的 Al_2O_3 与深绿辉石分解时释放出来的 CaO 、 SiO_2 相向迁移并相互反应而成。镁尖晶石的

完全消失,就是钙铝石榴石沉淀作用的终结。未被交代的深绿辉石程度不同地发生重新结晶,并随之使自己演化成为次透辉石—普通辉石。这样一来,就把矿物组合由镁尖晶石+深绿辉石,改造成为钙铝石榴石+次透辉石—普通辉石。

现在,以概括的形式列出所见到的矿物组合:碳硼硅钙镁石+次透辉石—普通辉石;碳硼硅钙镁石+钙镁橄榄石;碳硼硅钙镁石+符山石;碳硼硅钙镁石+钙铝石榴石;碳硼硅钙镁石+次透辉石—普通辉石+钙镁橄榄石;碳硼硅钙镁石+符山石+钙铝石榴石;碳硼硅钙镁石+钙镁橄榄石+符山石;钙镁橄榄石+次透辉石—普通辉石;钙镁橄榄石+符山石;钙镁橄榄石+符山石+钙铝石榴石;钙镁橄榄石+次透辉石—普通辉石+钙铝石榴石;次透辉石—普通辉石+钙铝黄长石;次透辉石—普通辉石+钙铝石榴石+符山石;符山石+次透辉石—普通辉石;钙铝石榴石+符山石(见图1);等等。

二、所述矿物组合形成时体系的主要特征

在前面的叙述中已多次指出,镁矽卡岩的钙质交代产物是源于镁矽卡岩与热液组份之间的相互反应过程。因而可以把镁矽卡岩形成后、钙质交代反应行将开始的时刻作为这一过程的始态,钙质交代产物中断形成的那一瞬间作为该过程的终态。在初始状态下,镁矽卡岩矿物与热的水溶液之间在热力学上是平衡的。其时,溶液的成份及体系的强度参数虽然可以在某一确定的范围内任意地变动,初始矿物的成份也许会在保持固有晶格的前提下按类质同像置换的规律作些调整,从溶液中吸收一些组份,释放出另一些组份,却始终不会导致镁矽卡岩的初始矿物发生任何蚀变,不会形成新的矿物。一旦体系强度参数的变化突破了那个确定的范围,

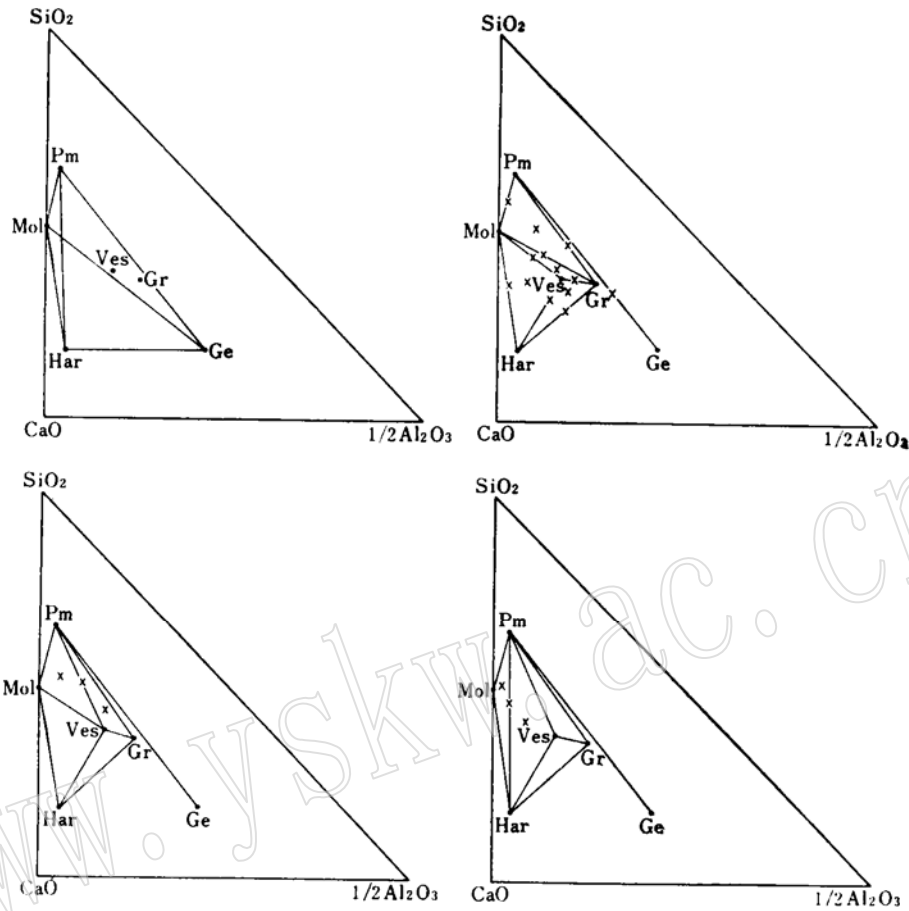


图 1 镁矽卡岩钙质交代产物的矿物组合

左上角的三角形图解标示出所述 6 种矿物彼此间的相对位置，它们构成具有两个内点的四边形。这两个内点与其余 4 点的相互关系属于 Od 型^[6]。另外三个图解分别标示着由所述矿物构成的共生组合。矿物代号在正文中已有说明。× 号表示所见到的矿物组合。

镁矽卡岩的初始矿物就会变得不稳定，依情况不同代之以不同的矿物，例如碳硼硅钙镁石、钙镁橄榄石、钙铝黄长石、钙铝石榴石、符山石等。倘若适于上述矿物形成的条件持续下去，就导致这些新生成的矿物大规模地堆积。

如果从化学组份的角度把交代矿物与初始矿物作一比较，并考察一下交代矿物的生成反应方程式，就不难揭示镁矽卡岩钙质交代过程中主要组份的来踪去影。经此分析得知，被交代矿物消失时释放出来的组份 Al_2O_3 、

SiO_2 基本上就地消耗在新生成矿物的格架里， MgO 仅仅部份进入新生成的矿物，部份随溶液迁往它处。这些新生成的矿物，除了继承被交代矿物的上述组份，还从溶液里吸收 CaO 、 FeO 、 B_2O_3 、 Cl_2 、 CO_2 、 H_2O 及少量 Al_2O_3 、 SiO_2 等。

与上述钙质交代产物形成相对应的体系，至少含有 TiO_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 Fe 、 B_2O_3 、 O_2 、 Cl 、 F 、 CO_2 、 H_2O 等组份。它对于前四者是相对封闭的，对于其余组份是相对开放的。作为惰性组份的

TiO₂, 主要参加到榍石的晶格。因此, 属于有效惰性组份的则是 Al₂O₃、SiO₂、CaO。在活动组份中, H₂O 和 CO₂ 显然是过剩的充分活动组份。由符山石、碳硼硅钙镁石的分布有限推知, MgO、FeO、B₂O₃、Cl₂ 的活度是依具体条件而异的, 可以看成是体系的有效活动组份。

从上述资料看出, 由于把榍石、方解石、磷灰石、磁铁矿等作为过剩矿物处理, 在每一共生组合中所包的矿物不超过三种。把所述矿物组合的这一特点与对应体系的有效惰性组份联系起来考虑, 就会得出结论: 镁矽卡岩钙质交代产物的矿物成分单值地取决于有效惰性组份的量比^[6], 可以用 Al₂O₃-SiO₂-CaO 体系来表达钙质交代产物的共生关系。由于所考虑的矿物有六种, 则上述体系就是三元六相复合体系。

复合体系 (мультисистема, multi-system) 这个概念, 是柯尔任斯基用施赖恩马克斯图示法研究矿物组合规律时提出来的^[6]。尔后, 札里科夫、任以安等学者从拓扑学角度对之作了深入研究, 认为复合体系理论及其作图规则, 对于揭示自然界矿物组合的生成及转化条件有实际价值。

把钙镁橄榄石 (Mol)、碳硼硅钙镁石 (Har)、符山石 (Ves)、次透辉石—普通辉石 (Pm)、钙铝黄长石 (Ge)、钙铝石榴石 (Gr) 标绘在以 Al₂O₃、SiO₂、CaO 为顶点的三角形上, 就构成一个具两个内点的四边形 (见图1左上角)。容易看出, 这六种矿物的成份点彼此间的相互关系在拓扑结构上属于 Qd 型, 与之对应的 6 个零变点及 15 条单变线构成唯一确定的完全封闭网^[6]。

三、 $\mu_{MgO}-\mu_{FeO}$ 图

为了探索镁矽卡岩钙质交代产物形成及存在的某些地球化学条件, 为了揭示上述矿物组合替换的内在因素, 特考虑所述三元六

$$\text{相复合体系在} \left(\frac{\Delta n_{FeO} \partial \mu_{FeO}}{\Delta n_{MgO} \partial \mu_{MgO}} \right)_{p, T, \Delta G=0} = 0$$

条件下的情况。根据已掌握的上述矿物的化学分析资料, 设它们的近似成份为: 钙铝石榴石—Ca₃Al₂Si₃O₁₂; 钙镁橄榄石—Ca(Mg_{0.86}Fe_{0.14})SiO₄; 碳硼硅钙镁石—Ca₄₈Mg₁₆Al₃(CO₃)₁₈(BO₃)₁₅(SiO₄)₁₂Cl₂(OH)₆·3H₂O; 次透辉石—普通辉石—Ca(Mg_{0.6}Fe_{0.4})(Si_{1.9}Al_{0.1})O₆; 钙铝黄长石—Ca₂Al₂SiO₇; 符山石—Ca₁₀(Mg_{1.0}Fe_{1.0})Al₄Si₉O₃₄(FOH)₄。

现在用上述六种矿物的代号及其所含有有效惰性组份的原子个数, 编成六个五行四列的行列式。将各行列式依次按第一列展开求出各单变反应式有关矿物的计量系数。

[Ge]				[Har]			
	Ca	Si	Al		Ca	Si	Al
Pm	1	1.9	0.1	Pm	1	1.9	0.1
Gr	3	3	2	Ge	3	3	2
Ves	10	9	4	Ves	10	9	4
Har	48	12	3	Mol	1	1	0
Mol	1	1	0	Ge	2	1	2

[Pm]				[Gr]			
	Ca	Si	Al		Ca	Si	Al
Har	48	12	3	Har	48	12	3
Ves	10	9	4	Pm	1	1.9	0.1
Gr	3	3	2	Ge	2	1	2
Ge	2	1	2	Ves	10	9	4
Mol	1	1	0	Mol	1	1	0

[Mol]				[Ves]			
	Ca	Si	Al		Ca	Si	Al
Har	48	12	3	Har	48	12	3
Ves	10	9	4	Pm	1	1.9	0.1
Pm	1	1.9	0.1	Ge	2	1	2
Gr	3	3	2	Gr	3	3	2
Ge	2	1	2	Mol	1	1	0

经过计算、作图及其它各种考虑, 得知线束 [Ge]、[Pm]、[Gr]、[Har] 对应的四个零变点在所限定的条件下是稳定的, 而点 [Ves] 和 [Mol] 则是亚稳定的。这样一来, 正确的作图方案就跃然纸上。

现在列出线束 [Ge]、[Pm]、[Gr]、[Har] 所属的单变反应方程组:

[Ge]点¹⁾

(Pm)

72Ves + 132.86MgO = 201Mol + 141Gr
+ 2Har + 44FeO (其余的活动组份, 例如
H₂O、Cl、CO₂等, 与计算该单变线的斜率
无关, 从略。下同)。

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{44}{132.86} = 0.3312;$$

$$\alpha = 18^{\circ}20'(+)$$

(Gr)

6.3Ves + 255.6Mol + 14.316FeO
= 141Pm + 3.7Har + 82.316MgO

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{14.316}{82.316} = 0.1739; \alpha = 9^{\circ}52'(+)$$

(Ves)

6.3Gr + 139.5Mol + 9.27FeO
= 72Pm + 1.8Har + 45.97MgO

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{9.27}{45.97} = 0.2017;$$

$$\alpha = 11^{\circ}24'(+)$$

(Har)

2Pm + 1.8Ves + 4.654MgO
= 3.7Gr + 8.9Mol + 1.354FeO

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{1.354}{4.654} = 0.2909; \alpha = 16^{\circ}13'(+)$$

(Mol)

139.5Ves + 86.6MgO = 8.9Har
+ 255.6Gr + 201Pm + 59.6FeO

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{59.6}{86.6} = 0.68 \quad \alpha = 34^{\circ}18'(+)$$

[Har]点

(Pm)

2Gr + 2Ge + 10Mol + 0.6FeO
= 2Ves + 6.8MgO

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{0.6}{6.8} = 0.0882; \alpha = 5^{\circ}5'(+)$$

(Gr)

2Pm + 3.7Ge + 9.6Mol

= 1.9Ves + 7.556MgO + 0.556FeO

$$\operatorname{tg}\alpha = -\frac{0.556}{7.556} = -0.0736;$$

$$\alpha = 4^{\circ}14'(-)$$

(Ves)

2Pm + 1.8Ge + 0.1Mol =
= 1.9Gr + 0.814FeO + 1.286MgO

$$\operatorname{tg}\alpha = -\frac{0.814}{1.286} = -0.633;$$

$$\alpha = 32^{\circ}20'(-)$$

(Mol)

10Pm + 0. Ves + 8.9Ge = 9.6Gr +
4.01FeO + 6.01MgO

$$\operatorname{tg}\alpha = -\frac{4.01}{6.01} = -0.6672;$$

$$\alpha = 34^{\circ}7'(-)$$

(Ge)

2Pm + 1.8Ves + 4.65MgO
= 3.7Gr + 8.9Mol + 1.35FeO

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{1.354}{4.654} = 0.2909; \alpha = 16^{\circ}13'(+)$$

[Pm]点

(Har)

2Ves + 6.4MgO
= 2Gr + 2Ge + 10Mol + 0.6FeO

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{0.6}{6.4} = 0.0938; \alpha = 5^{\circ}22'(+)$$

(Ves)

2Har + 69Gr + 104.74MgO + 22.26FeO
= 72Ge + 159Mol

$$\operatorname{tg}\alpha = -\frac{22.26}{104.74} = -0.2125;$$

$$\alpha = 12^{\circ}(-)$$

(Gr)

1) 矿物代号与方括号组合起来表示零变点 (invariant points)

2) 矿物代号与圆括号组合起来表示单变线 (monovariant curves)

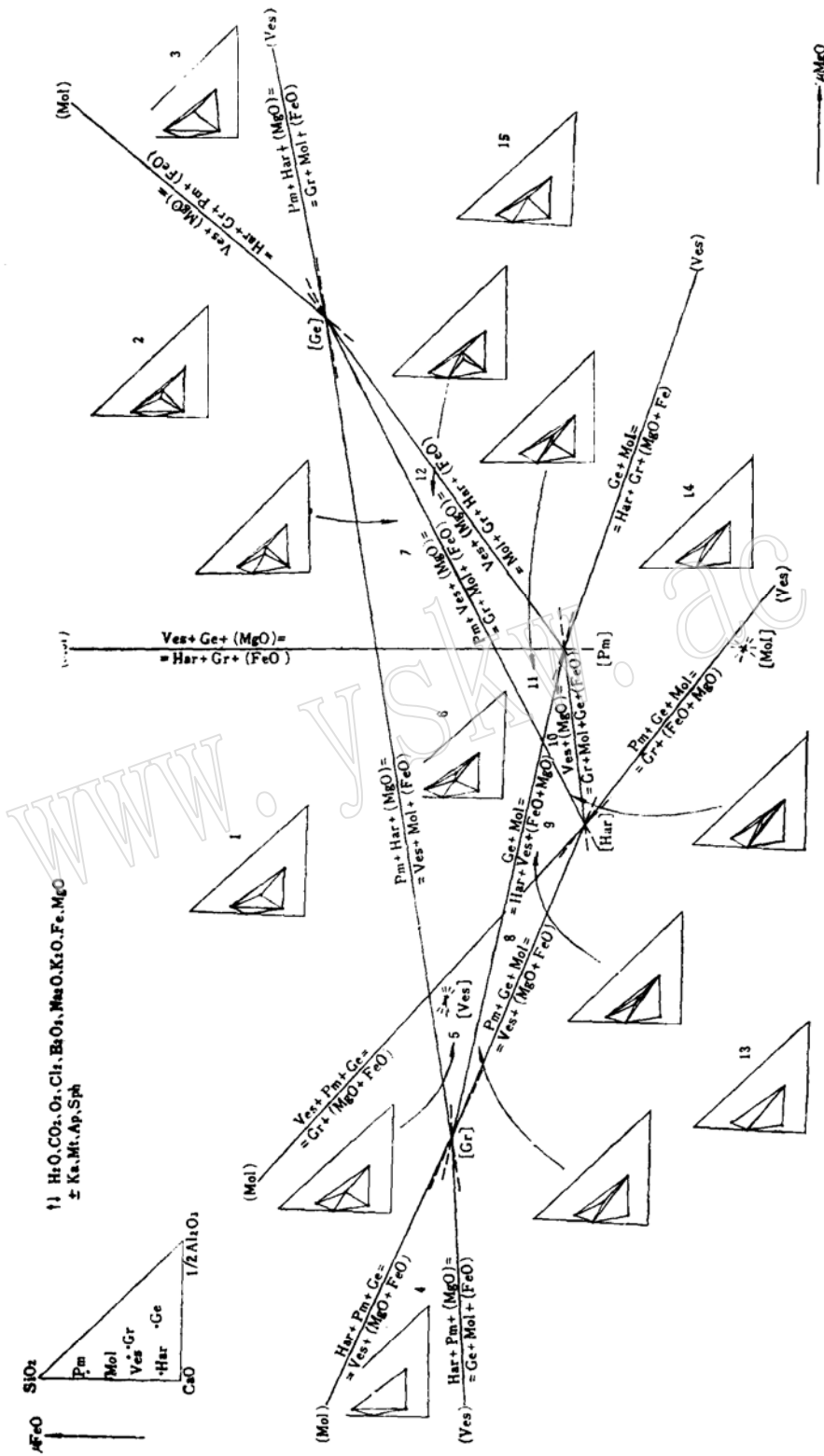
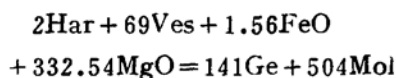


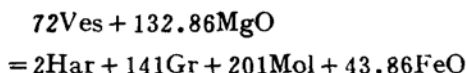
图 2 镁砂卡岩钙质交代产物的共生组合对 μFeO 和 μMgO 的依从关系
 这是一个四点部份封闭网 (partially closed net)。它包含 4 个稳定的零变点, 13 条单变线, 15 个双变区 (divariant regions), 5 个呆性交叉点 (indifferent crossing)。↑ 表示充分活动组份



$$\text{tg}\alpha = -\frac{1.56}{332.54} = -0.0047;$$

$$\alpha = 0^\circ 16' (-)$$

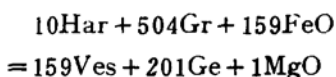
(Ge)



$$\text{tg}\alpha = \frac{43.86}{132.86} = 0.3301;$$

$$\alpha = 18^\circ 17' (+)$$

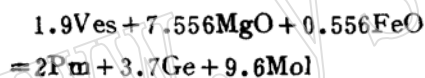
(Mol)



$$\text{tg}\alpha = \frac{159}{1} = 159; \alpha = 89^\circ 38' (+)$$

[Gr]点

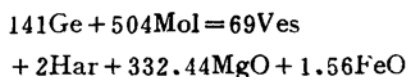
(Har)



$$\text{tg}\alpha = -\frac{0.556}{7.556} = -0.0736;$$

$$\alpha = 4^\circ 14' (-)$$

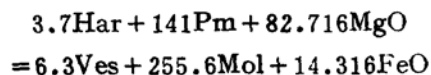
(Pm)



$$\text{tg}\alpha = -\frac{1.56}{332.44} = -0.0047;$$

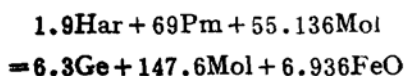
$$\alpha = 0^\circ 16' (-)$$

(Ge)



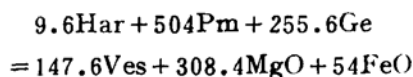
$$\text{tg}\alpha = \frac{14.316}{82.716} = 0.1739; \alpha = 9^\circ 52' (+)$$

(Ves)



$$\text{tg}\alpha = \frac{6.936}{55.136} = 0.1258; \alpha = 7^\circ 10' (+)$$

(Mol)



$$\text{tg}\alpha = -\frac{54}{308.4} = -0.1751;$$

$$\alpha = 9^\circ 56' (-)$$

于是, 就可根据上述各零变点所属的单变反应方程式及对应平衡线的斜率, 作出一个部份封闭的网图, 借以表达出镁矽卡岩钙质交代产物的矿物组合对铁、镁化学势的依从关系 (图2)。为了使图面紧凑、美观, 作图时在不改变四线束拓扑类型的前提下, 有意识地夸大了某些单变平衡线的斜率。

现在以图2为基础, 对镁矽卡岩的钙质交代产物作些分析。由该图看出, 钙铝石榴石的稳定域比符山石的稳定域小一些。钙铝石榴石形成时, 铁、镁的化学势都比较低, 当 μ_{FeO} 和 μ_{MgO} 逐渐增高而达某一限度时, 它势必从稳定变为不稳定, 代之以 $\text{Pm} + \text{Ge} + \text{Mol}$ 或 $\text{Ves} + \text{Pm} + \text{Ge}$ 。符山石形成时, 要求铁、镁的化学势大体上达到中等水准, 但是随着这两种组份的化学势进一步增高, 它也会从稳定状态转变成不稳定。在 μ_{FeO} 较低的情况下, 符山石的稳定域, 在图的右侧不会超出单变线 $\text{Ves} = \text{Gr} + \text{Har} + \text{Mol}$, 当 μ_{FeO} 稍高一些时, 它的稳定域按单变线 $\text{Ves} = \text{Har} + \text{Gr} + \text{Pm}$ 所示的范围朝右上方逐渐扩大。

由于符山石和石榴石遍布于镁矽卡岩钙质交代产物的各个部份, 形成各种各样的矿物组合, 因而可以这两种矿物作参考分析有关共生组合对铁、镁化学势的依从性。图2指出, 含有符山石的矿物组合, 基本上限定在单变线 $\text{Ves} = \text{Har} + \text{Pm} + \text{Gr}$ 、 $\text{Ves} = \text{Pm} + \text{Ge} + \text{Mol}$ 、 $\text{Ves} = \text{Gr} + \text{Mol} + \text{Gr}$ 、 $\text{Ves} = \text{Gr} + \text{Mol} + \text{Har}$ 、 $\text{Ves} = \text{Gr} + \text{Har} + \text{Pm}$ 的上半部。兼含符山石和石榴石两矿物的共生组

合,集中在5、6、8、9、10、11等6个双变区里。与这些双变区相对应的 μ_{FeO} 值及 μ_{MgO} 值,从总体上决定了本区镁矽卡岩钙质交代产物共生组合的基本特征。从Ves+Pm+Mol组合、Ves+Gr+Har组合及Har+Mol+Pm组合所在的双变区看出,在镁矽卡岩发生钙质交代作用的过程中,铁、镁化学势的变化对其时形成何种共生组合有很大的灵敏度。

鉴于所述交代产物的热力学参数不全,例如尚无碳硼硅钙镁石、钙铝黄长石的摩尔焓值可资利用,因此本文无法从温度、压力的角度对所述矿物组合进行分析。

参考文献

[1] Schreinemakers, F. A. H., 1915—1925, In-, mono-, and divariant equilibria, Koninkl. Ned-

erlandse Akad. Wetensch. proc. (English edition), vol. 18—28. (29 separate articles in the series).

[2] Шабынин, Л. И., 1968, О геохимических условиях образования везувияна в скарнах. —Геохимия. №10.

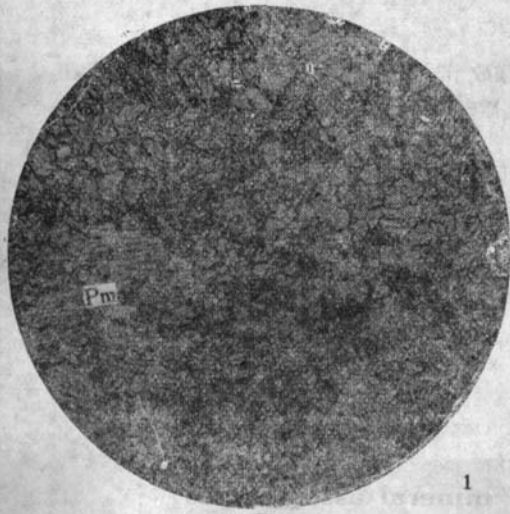
[3] Шабынин, Л. И., 1975, О границах гермина "Фассаит" и некоторых различиях пироксенов пород формации магнезиальных скарнов. —В кн: Метасоматиты и оруденение. М., "Наука".

[4] 王书凤 1979 碳硼硅钙镁石在我国发现 地质评 第25卷 第2期

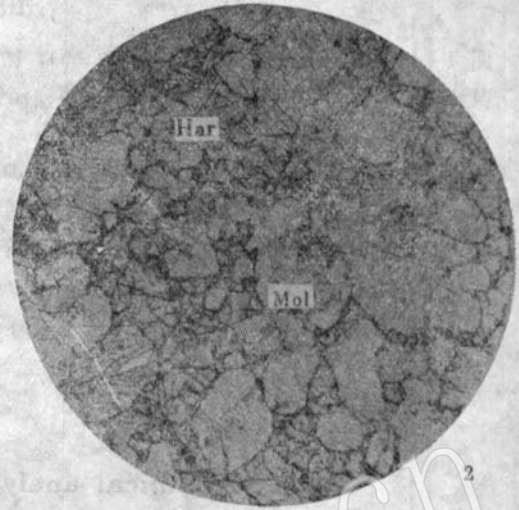
[5] E-An Zen, 1972, Some topological relationships in multisystems of $n+3$ phases. III. Ternary systems, Am. Jour. Sci., vol. 272, P. 677—711.

[6] Коржинский, Д. С., 1973, Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М., "Наука".

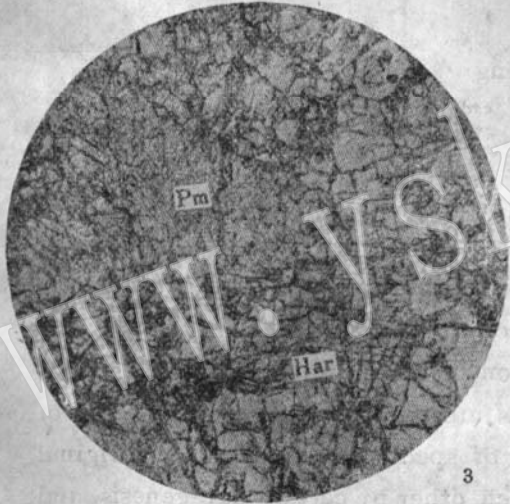
www.yskw.ac.cn



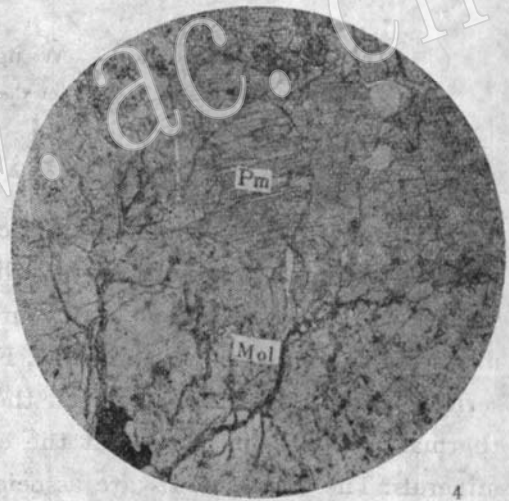
1



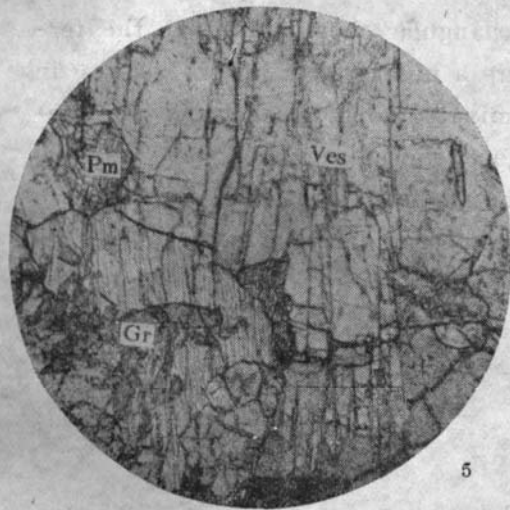
2



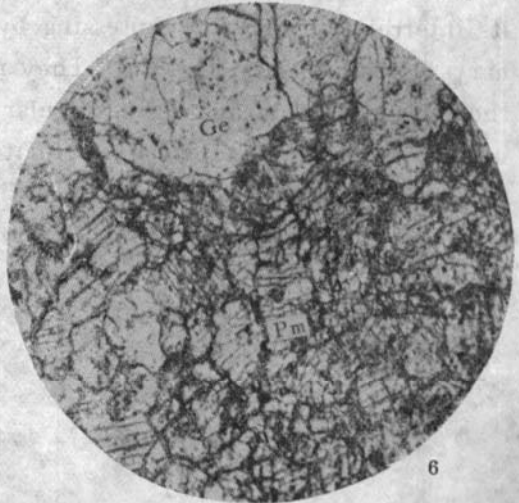
3



4



5



6

图版说明

图 1 粗晶者为次透辉石—普通辉石(Pm)，微晶者为镁砂卡岩固有矿物深绿辉石。前者是后者在保持辉石固有晶格的前提下部份脱铝、脱镁而代之以铁质组份的结果。深灰色微晶者为镁尖晶石。单偏光×63

图 2 碳硼硅钙镁石(Har) + 钙镁橄榄石(Mol) 单偏光×35

图 3 碳硼硅钙镁石(Har) + 次透辉石—普通辉石(Pm)单偏光×35

图 4 钙镁橄榄石(Mol) + 次透辉石—普通辉石(Pm)单偏光×35

图 5 符山石(Ves) + 次透辉石—普通辉石(Pm) + 钙铝石榴石(Gr) 单偏光×35

图 6 钙铝黄长石(Ge) + 次透辉石—普通辉石(Pm)单偏光×100

Thermodynamical analysis of mineral assemblages

Wang Shufeng

(Institute of mineral deposits of the Chinese Academy of Geological Sciences)

Abstract

The mentioned calcimetasomatal production formed from magnesioskarns consists of harkerite, monticellite, salite-augite, grossular, gehlenite, vesuvianite and so on. It was sediment at favourable section of the various rocks of the magnesioskarns by the certain law. Formation of these mineral derived from series of mutual reaction between the skarns minerals and the components of thermal solution, and it was at the expense of special paragenesis of original minerals. The six minerals are associated each other by certain paragenesis, and its interrelation may be expressing by the triangular chemography in the ternary system $Al_2O_3-SiO_2-CaO$. They make up a multisystem of six phases in the ternary system and have singular determinated topological type. The mentioned mineral assemblages are relate to geochemical behaviour of the iron and magnesium in the thermal solution. The chemical potential of the two components is determinate regularity of replacement of the mineral assemblages.