

榴辉岩的石榴子石

从柏林 张雯华

(中国科学院地质研究所)

榴辉岩是地表少见但产状却相当复杂的一种岩石。它既可以在上地幔中由岩浆形成,也可以在地壳中因变质作用而生成。历来地质工作者相当关注各类榴辉岩的鉴别及其成因问题。本文根据榴辉岩中石榴子石的成分变化,采用 $Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$ 值对 Ca^{+2} 量的投影图 (Mg 、 Fe^{+2} 、 Mn 和 Ca 皆为石榴子石中以 $O = 12$ 的二价阳离子数),鉴别各类榴辉岩,并探讨它们形成的温压条件。

Coleman等^[1]主张将榴辉岩三分,即:(1)与超镁铁岩共生的榴辉岩(即金伯利岩和玄武岩中榴辉岩包体及超镁铁岩体中的榴辉岩条带), Py (石榴子石中镁铝榴石分子的百分数) > 55 ; (2) 片麻岩中的榴辉岩, Py 为 30—55; (3) 蓝闪石片岩相的榴辉岩, $Py < 30$ 。但是,据本文的统计(表 1),金伯利岩和玄武岩中榴辉岩包体的石榴子石,其成分变化范围远较上述(1)类大得多。显然, Coleman 等的榴辉岩三分法是不恰当的。

表 1 金伯利岩和玄武岩中榴辉岩包体的石榴子石成分

石榴子石的主要 端元分子百分数	钙铬榴石 (Uv)		钙铁榴石 (And)		镁铝榴石 (Py)		锰铝榴石 (Sp)		钙铝榴石 (Gro)		铁铝榴石 (Alm)		样品数
	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	
玄武岩中二矿物 榴辉岩包体 ¹⁾	0.2	0.0—1.2	4.8	2.0—7.7	59.5	44.9—65.0	1.0	0.7—1.5	7.9	2.0—11.0	27.6	19.9—39.9	7
金伯利岩中二矿物 榴辉岩包体 ²⁾	1.7	0.0— 10.2	3.8	0.4—8.4	59.2	33.5—77.5	0.8	0.2—2.1	8.4	1.4—20.1	25.9	10.5—39.1	20
金伯利岩中榴辉 蓝晶岩包体 ³⁾	0.0	0.0—0.0	5.6	3.2—8.3	28.5	11.8—45.4	0.7	0.3—1.4	50.3	37.9—66.4	14.9	6.1—28.2	7
金伯利岩中含金 刚石榴辉岩包体 ⁴⁾	0.3	0.0—0.5	7.5	1.1—11.7	41.6	33.3—63.9	0.8	0.6—1.1	13.7	2.0—24.6	36.1	24.1—45.7	14

资料来源: 1) H. Kuno(1969); S. Dickey(1968); A. J. R. White 等 (1972). 2) I. Kushiro 等 (1968); P. H. Nixon 等 (1963); H. O. A. Meyer (1971); H. B. Соболев 等 (1964); E. E. Лазько (1971). 3) H. B. Соболев 等 (1966). 4) P. C. Rickwood 等 (1970); H. B. Соболев 等 (1966, 1969).

Rickwood 等^[2]将金伯利岩中榴辉岩包体分为: 组 I 榴辉岩、组 II 榴辉岩、组 K 榴辉岩以及组 C 榴辉岩。组 I 和组 II 为二矿物(绿辉石和石榴子石)榴辉岩,但后者普遍发育角闪石,且其单斜辉石较前者含较高的钾。组 K 和组 C 榴辉岩分别以发育蓝晶石和刚玉为特征,故分别称为蓝晶榴辉岩和刚玉榴辉岩(或称为榴辉蓝晶岩)。至今,玄武岩中仅

见有二矿物榴辉岩包体。在金伯利岩中,上述四组榴辉岩包体中皆已发现有含金刚石的实例,故金伯利岩中含金刚石榴辉岩包体并非为特殊的榴辉岩类型。

Banno^[3]试图用榴辉岩的石榴子石(Gar)和单斜辉石(Cpx)之间的 Fe-Mg 分布系数

本文 1976 年 12 月 20 日收到。

$K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ (Fe 为 Fe^{+2}) 对榴辉岩分类。 $K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ 值由下式求得:

$$K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx} = \frac{x_{Fe}^{Gar}}{1 - x_{Fe}^{Gar}} \cdot \frac{1 - x_{Fe}^{Cpx}}{x_{Fe}^{Cpx}},$$

这里, x_{Fe}^{Gar} 和 x_{Fe}^{Cpx} 分别为石榴子石和单斜辉石的克分子分率 $Fe/(Fe + Mg)$ 。实际上 $K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ 表明了共存 Gar 和 Cpx 之间 Fe 分布的有序性。Banno 基于热力学公式的推导得出结论: $K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ 取决于温度和压力,而与成分无关。温度愈高, $K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ 值愈小,反之,压力愈高, $K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ 值愈大。本文的统计表明, $K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ 还与石榴子石中 Ca^{+2} 量呈正比关系。这与 MacGregor^[4] 的 $MgO-CaO-Al_2O_3-SiO_2$ 系的实验结果是相吻合的。他指出, 仅与 Cpx 共生的 Gar, 随着压力的增高 (即 $K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ 值增大), 其含 Ca 量增加。

多方面的研究表明, 玄武岩和金伯利岩中榴辉岩包体形成于上地幔的温压条件下,

由镁铁质岩浆早期分离结晶作用的产物的堆积或相变而形成。例如, Davis 等(1966)根据单斜辉石的成分及高温高压实验资料, 推断南非巴苏陀兰金伯利岩中三个二矿物榴辉岩形成的条件为 30 千巴压力下 1000—1300°C, 即大约形成于 100 公里的深度上。因此可将榴辉岩分为两大成因类型, 即上地幔中岩浆成因的榴辉岩和地壳中变质成因的榴辉岩。

从表 2 中可以看出, $K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ 值能较好地用以区分同一成因的榴辉岩, 而不能确切地区别这两大成因的榴辉岩。

从表 2 中还可看出, 金伯利岩和玄武岩中的榴辉岩包体, 按组 I——组 II——榴辉蓝晶岩的排列顺序, $K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ 值愈大。这说明, 顺此排列顺序, 榴辉岩的形成压力愈高, 而逆此排列顺序, 榴辉岩形成温度愈高。值得注意的是, 即便在同一个岩筒中含金刚石榴辉岩的 $K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ 值也变化很大。这表明, 含金

表 2 不同产状榴辉岩的 $K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$ 值及石榴子石中 Ca^{+2} (或 CaO) 含量

成因	寄生岩的名称	样品数	$K_{D(Fe)}^{Gar-Cpx}$		Ca^{+2}	
			平均	范围	平均	范围
岩浆成因	玄武岩中二矿物榴辉岩包体(夏威夷、新西兰)	7	2.6	1.7—5.0	0.38	0.25—0.41
	金伯利岩中:					
	组 I 榴辉岩包体(南非, 罗伯兹·维克多岩筒);	6	3.6	2.9—4.4	0.38	0.26—0.61
	组 II 榴辉岩包体(美国勒萨斯州斯托克得勒);	3	7.7	5.2—9.7	0.58	0.41—0.71
	榴辉蓝晶岩包体(苏联雅库梯);	3	10.2	8.6—10.6	2.00	1.61—2.42
变质成因	含金石榴榴辉岩包体(苏联“和平”岩筒)	3	7.9	4.7—10.3	0.93	0.77—1.12
	粒变岩相榴辉岩				CaO	(重量百分比)
	瓦尔贝里	6	6.0	5.0—7.2		6.4—13.6
	其它地区	14	7.3			
	角闪岩相榴辉岩					
	苏 格 兰	2	8.1	6.9—9.3		
	挪 威	4	9.1			
	绿帘石-角闪岩亚相					
	非希特格比尔兹	2	11.6	11.5—11.7		
	贝 西	4	12.2	11.3—13.7	6.76	(仅一个数据)
	巴伐利亚	4	11.3			
	蓝闪石片岩相榴辉岩					
	加里福尼亚	6	23.2	18.8—30.3		9.5—13.7

注: 岩浆成因榴辉岩是根据表 1 所列文献由本文作者计算的。变质成因是根据 S. Banno (1967, 1970) 和 S. K. Saxena (1968) 的资料。

刚石榴辉岩形成的温压范围是相当宽的。

在变质成因的榴辉岩中,由粒变岩相,经角闪岩相和绿帘石-角闪岩亚相,至蓝闪石片岩相, $K_{D(Fe)}^{Gr-Cpx}$ 值愈来愈大。据 Fyfe 等人 (1965) 的资料,加里福尼亚蓝闪石片岩相岩石形成的温压条件为 5—10 千巴和 150—300°C。一般认为,粒变岩相的温压条件最可能为 4—8 千巴和 600—800°C。也就是说,两者的压力相差不大而温度相差很大。有趣的是,两者的 CaO 量也差异不大而 $K_{D(Fe)}^{Gr-Cpx}$ 值相差很大(表 2)。由此可以推测,石榴子石中的 Ca^{+2} 量主要取决于其形成压力,压力愈高, Ca^{+2} 量也就愈大。对于变质成因的榴辉岩来说,其 $K_{D(Fe)}^{Gr-Cpx}$ 值主要取决于形成温度,温度愈高, $K_{D(Fe)}^{Gr-Cpx}$ 值愈小。在岩浆成因的榴辉岩中石榴子石含 Ca^{+2} 量变化很大, $K_{D(Fe)}^{Gr-Cpx}$ 值变化也很大,且两者变化呈正消长关系。这表明,岩浆成因的榴辉岩的 $K_{D(Fe)}^{Gr-Cpx}$ 值主要取决于压力,压力愈高, $K_{D(Fe)}^{Gr-Cpx}$ 值愈大。这就是这两种不同成因类型榴辉岩不能直接用 $K_{D(Fe)}^{Gr-Cpx}$ 值相比较的根本原因。

石榴子石的形成温度愈高,其含镁量也愈高。这是人所共知的。石榴子石是一种固溶体,其主要的二价阳离子 (Mg^{+2} 、 Fe^{+2} 、 Ca^{+2} 、 Mn^{+2}) 的基本地球化学属性如下:

离子半径(Å)	Mg^{+2}	Fe^{+2}	Ca^{+2}	Mn^{+2}
	0.65	0.75	0.99	0.80

电离势(ev) 14.96 16.16 11.82 15.70

它们中间 Mg^{+2} 、 Fe^{+2} 、 Mn^{+2} 彼此有更为相近的地球化学属性。这就决定了在石榴子石固溶体中它们更易彼此交代。镁铝榴石、铁铝榴石和锰铝榴石在任何温压条件下都趋向于理想的混溶。但是,实验表明,钙铝榴石随温度增高更易从固溶体中分解出来,而在高压下易进入固溶体,且压力愈高,钙铝榴石和镁铝榴石混溶程度愈高。因此,用石榴子石的 Ca^{+2} 对 $Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$ 来作投影图,客观上反映了石榴子石形成的温压关系。 Ca^{+2} 量与压力呈正消长关系,而 $Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$ 值与温度呈正消长关系。

图 1 是表 3 的资料在 $Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$ — Ca^{+2} 图上的投影。图中界线 1 和 2 是沿用 Saxena (1968) 的,而界线 3 和 ZC 是本文新拟定的。ZC 线是上地幔中岩浆成因的石榴子石和地壳中变质成因的石榴子石的分界线。不仅金伯利岩和玄武岩中榴辉岩包体的石榴子石,而且它们的斑晶石榴子石和它们中超镁铁岩包体的石榴子石以及金刚石中石榴子石包体,皆投影于 ZC 线之上方。同样,不仅地壳中变质成因的榴辉岩的石榴子石,而且各种变质成因的非榴辉岩质岩石的石榴子石,皆投影于 ZC 线之下方。为了图面清楚,在图 1 中仅投影了各种榴辉岩的石榴子石分析结果。界线 3 在变质成因的石榴子石投影

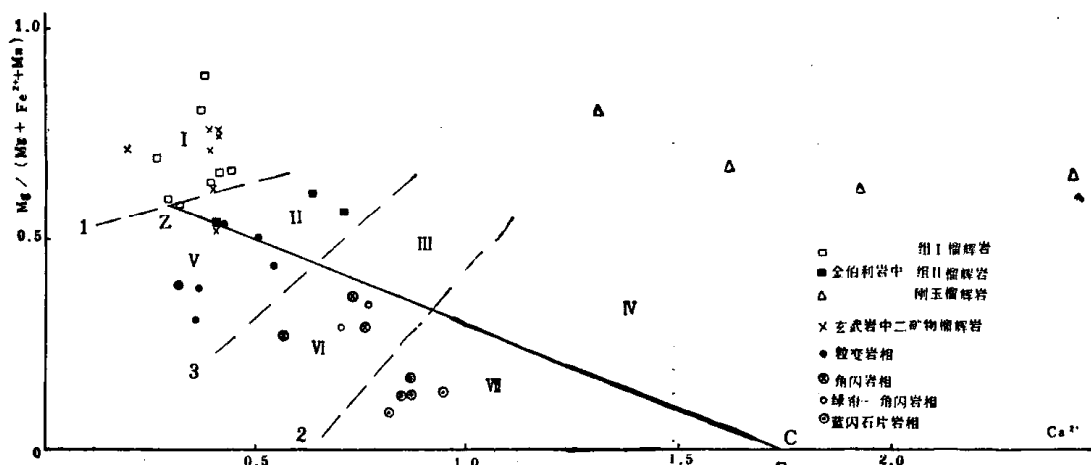


图 1 不同产状榴辉岩的石榴子石的 $Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$ 值对 Ca^{+2} 量的投影图

区中为粒变岩相和角闪岩相的榴辉岩的分界线,而在岩浆成因的石榴子石投影区中可能

表3 不同产状的榴辉岩中石榴子石的
 $Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$ 值及 Ca^{+2} 量

寄生岩的名称	$Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$	Ca^{+2}
玄武岩中榴辉岩包体 新西兰	0.522	0.407
	0.763	0.390
	0.753	0.410
	0.624	0.398
夏威夷	0.749	0.408
	0.718	0.245
	0.709	0.390
金伯利岩中组 I 榴辉岩包体 南非非罗伯兹·维克多	0.668	0.608
	0.669	0.440
	0.639	0.393
	0.578	0.311
	0.596	0.289
	0.698	0.263
南非巴苏陀兰	0.888	0.373
	0.661	0.416
	0.806	0.368
组 II 榴辉岩包体 美国勒萨斯州斯托克勒岩筒	0.607	0.627
	0.537	0.406
	0.567	0.707
榴辉蓝晶岩包体 苏联雅库梯	0.675	1.610
	0.616	1.920
	0.648	2.420
	0.807	1.250
粒变岩相榴辉岩 苏伯拉曼莱	0.540	0.420
	0.440	0.538
	0.507	0.498
	0.357	0.305
	0.363	0.383
阿狄隆达克	0.316	0.389
角闪岩相榴辉岩 苏格兰	0.272	0.565
	0.294	0.759
捷克苏台德	0.365	0.730
	0.386	0.420
绿帘石-角闪岩亚相 委内瑞拉	0.295	0.70
	0.350	0.76
蓝闪石片岩相榴辉岩 加利福尼亚	0.175	0.866
	0.142	0.946
	0.096	0.816
	0.135	0.847
	0.137	0.867

注: 资料来源同表 2.

为组 II 榴辉岩和组 K 榴辉岩(蓝晶榴辉岩)的分界线.于是,在图 1 中可以划分出以下七个投影区: I. 组 I 榴辉岩; II. 组 II 榴辉岩; III. 可能为蓝晶榴辉岩(本文未收集到金伯利岩中此类榴辉岩的石榴子石分析结果); IV. 刚玉榴辉岩(或称榴辉蓝晶岩); V. 粒变岩相榴辉岩; VI. 角闪岩相榴辉岩(包括绿帘石-角闪岩亚相); VII. 蓝闪石片岩相榴辉岩.

从图 1 中可以得以下几点认识:

1. 地幔中岩浆成因的石榴子石和地壳中变质成因的石榴子石相比,在相似的 Ca^{+2} 量下前者较后者有更高的 $Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$ 值,而在相似的 $Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$ 值下前者较后者有更高的 Ca^{+2} 量.这说明整体上前者较后者形成于更高的温压条件下.

2. 幔成榴辉岩的石榴子石的 $Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$ 值相差不大,而它们的 Ca^{+2} 量相差很大.尤其是二矿物榴辉岩的石榴子石(I 和 II 区)含 Ca^{+2} 量较榴辉蓝晶岩(IV 区)低得多.由此可以推测:前者形成于因压力骤降而向上运移的岩浆体中,而后者形成于停滞封闭的岩浆库中(压力高,故 Ca^{+2} 量大).

3. 壳成榴辉岩中,由粒变岩相(V区),经角闪岩相(VI区),至蓝闪石片岩相(VII区)的榴辉岩,它们的石榴子石的 Ca^{+2} 量愈来愈高,而 $Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$ 值愈来愈低.这表明,按此顺序,榴辉岩的形成压力愈来愈高,而形成温度愈来愈低.

总之,石榴子石的 $Mg/(Mg + Fe^{+2} + Mn)$ 值和 Ca^{+2} 量,不仅可以用来鉴别各类榴辉岩,而且可以近似地作为地质温度计.

参 考 资 料

- [1] Coleman, R. G. et al., *Bull. Geol. Soc. Am.*, **76** (1965), 483—506.
- [2] Rickwood, P. C. et al., *Contr. Mineral and Petrol.*, **19** (1968), 271—301.
- [3] Banno, S., *Phys. Earth. Planet. Interiors*, **3** (1970), 405—421.
- [4] MacGregor, Ian. D., *Phys. Earth Planet. Interiors*, **3** (1970), 372—377.