

# 山东、辽宁金伯利岩中石榴石的类型、 标型特征及其与金刚石的关系

周秀仲 黄蕴慧 秦淑英 高岩 杨建民\*

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京 100037)

**主题词:** 金伯利岩; 石榴石; 类型; 标型特征; 金刚石

**提 要:** 金伯利岩中的镁铝榴石是寻找金刚石的重要指示矿物。镁铝榴石的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  等氧化物含量及其颜色、折光率等物理光学性质可作为这种石榴石的标型特征。

本文将山东、辽宁等地金伯利岩中的石榴石的电子探针分析结果按分子数配分的方法计算了端员分子百分数及其他化学参数。用 MPV-1 显微光度仪测定了石榴石的透射率色散值, 通过计算求得颜色指数。按 Dawson 等人的分类, 本次研究样品以铬镁铝榴石为主, 其次是低钙-铬镁铝榴石、钙铬-镁铝榴石和镁铬-钙铬-镁铝榴石, 钛镁铝榴石和钙镁铝-铁铝榴石等少量。作者用铬、钙、镁三组份数绘制了石榴石与金刚石关系判别图解, 分为五个区 (A、B、C、D、E), 落入 A 区的低钙-铬镁铝榴石、铬镁铝榴石和钙铬-镁铝榴石等与金刚石的形成关系最密切。

## 一、石榴石的类型

石榴石的电子探针分析约 80 个, 其部分分析结果列于表 1。

### 1. 按端员分子分类

石榴石端员分子百分数是按分子数配分的方法计算的<sup>[1]</sup>, 其基本原则是按阳离子大小确定计算顺序。因  $\text{Cr}^{3+}$  对镁铝榴石的物理、化学性质的影响远远超过  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  比  $\text{Mg}^{2+}$  又易氧化, 所以将  $\text{Cr}^{3+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  分别提到  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  之前计算。同时考虑到镁铬榴石分子与金刚石的形成密切相关, 故将原排列顺序中的镁铬榴石提到镁铝榴石前计算, 计算顺序见表 1。

计算结果表明, 在石榴石的 9 个端员中, 一般都以 2—3 个为主, 其中尤以镁铝榴石分子占优势, 其次是钙铬榴石和镁铬榴石分子等。因此, 按端员分子可将镁铝榴石分为若干类, 如: 钙铬-镁铝榴石 (表 1—3, 10)、镁铬-钙铬-镁铝榴石 (表 1—8, 16, 26, 37, 40, 41, 42)、钙铬-镁铬-镁铝榴石 (表 1—23, 28, 36)、镁铬-镁铝榴石 (表 1—20)、铁铝-镁铬-镁铝榴石 (表 1—23)、铁铝-镁铝榴石 (表 1—47)、钙铬-铁铝-镁铝榴石 (表 1—50) 和钙铝-镁铝-铁铝榴石 (表 1—48) 等。

### 2. 按主要化学成分分类

Dawson 和 Stephens<sup>[2]</sup> 根据石榴石的主要化学成分  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{CaO}$  的含量将石榴石分成 12 个化学组, 本文以 DG1—DG12 表示。为使分类简单明了, 在上述分类基

\* 参加工作的还有邓楚均、郭月敏、赵东高和李戈晶。

础上结合K. H. 尼基绍夫<sup>[3]</sup>的CaO—Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>分类图解(图1)对石榴石进行分类,结果见表2。

由图1、表2看出,本文中的石榴石以铬镁铝榴石(Chrome-pyrope, DG9)为主,其次为低钙-铬镁铝榴石(Low-calcium chrome-pyrope, DG10)、钙铬-镁铝榴石(Uvarovite-pyrope, DG11)和镁铬-钙铬-镁铝榴石(Knorringitic uvarovite-pyrope, DG12),钛

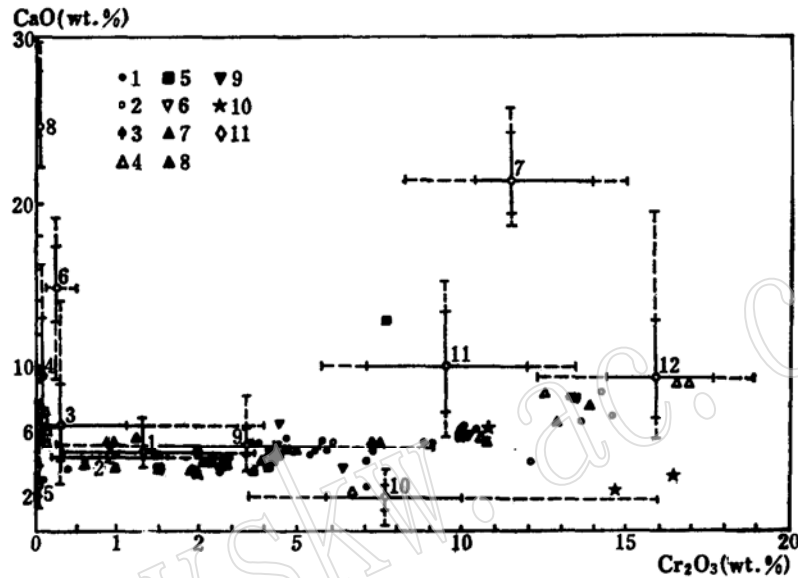


图1 石榴石Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO分类图解<sup>[3]</sup>

Fig. 1. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO classification of garnet

1—胜利1号; 2—红旗27号; 3—红旗1号; 4—50号; 5—51号; 6—42号; 7—30号; 8—68号; 9—铁岭(1—3, 山东; 4—9, 辽宁); 10—山东胜利1号岩筒金刚石中包裹体; 11—辽宁、河北榴辉岩中石榴石。

镁铝榴石(Titanian pyrope, DG1)、高钛镁铝榴石(High-titanium pyrope, DG2)、钙镁铝-铁铝榴石(Calcic pyrope-almandine, DG3)、钛钙镁-铁铝榴石(Titanian, calcic, magnesian almandine, DG4)和镁铁铝榴石(Magnesian almandine, DG5)少量。其中, DG10、DG11和DG9组中含Cr较高者与金刚石形成关系密切(详见第五部分)。

表 1 石榴石的化学成分  
Table 1. Chemical composition of garnet

序号		1	3	8	10	16	20	26	36	37
内容										
氧化物 (重量%)	SiO <sub>2</sub>	42.79	42.72	41.25	42.10	41.87	41.35	41.24	40.32	42.36
	TiO <sub>2</sub>	0.28	0.13	0.13	1.30	0.41	0.07	0.09	0.18	0.39
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.29	17.86	16.87	18.45	20.68	18.40	15.73	12.86	11.85
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.17	5.83	8.82	5.28	3.58	7.02	10.03	13.35	13.19
	TFeO	5.78	6.75	7.17	5.98	8.10	6.65	6.65	6.56	5.36
	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.42	2.41	0.35	1.43	0.40	1.62	0.46	0.74	3.19
	(FeO)	5.40	4.58	6.86	4.70	7.74	5.19	6.24	5.89	2.49
	MnO	0.26	0.56	0.35	0.21	0.31	0.31	0.38	0.34	0.36
	MgO	22.20	20.03	19.60	21.87	19.51	22.38	19.42	18.84	18.27
	CaO	4.86	5.04	5.71	4.63	5.39	3.22	6.38	6.70	8.21
	Na <sub>2</sub> O	—	—	0.04	0.10	—	0.04	0.03	0.05	—
	总计	99.83	98.92	99.94	99.92	99.85	99.44	99.95	99.20	100.00
以 O <sub>12</sub> 为基础计算阳离子数	Si	3.045	3.080	3.000	3.002	3.003	2.971	3.014	3.008	3.099
	Ti	0.017	0.008	0.008	0.068	0.025	0.004	0.006	0.011	0.024
	Al	1.450	1.518	1.449	1.551	1.749	1.562	1.355	1.131	1.002
	Cr	0.403	0.332	0.508	0.298	0.203	0.399	0.580	0.787	0.763
	Fe <sup>3+</sup>	0.023	0.131	0.019	0.077	0.021	0.088	0.025	0.042	0.176
	Fe <sup>2+</sup>	0.321	0.276	0.418	0.280	0.465	0.312	0.381	0.368	0.152
	Mn	0.016	0.034	0.022	0.013	0.019	0.019	0.024	0.021	0.022
	Mg	2.354	2.152	2.127	2.324	2.086	2.397	2.115	2.095	1.992
	Ca	0.371	0.389	0.446	0.354	0.414	0.248	0.500	0.536	0.644
Fe <sup>2+</sup> /(Fe <sup>2+</sup> +Mg)%		12.01	11.38	16.41	10.76	18.21	11.52	15.27	14.93	7.09
Cr/(Fe <sup>2+</sup> +Al)%		21.76	17.96	25.96	16.10	10.40	20.34	29.95	41.04	42.74
Mn/(Fe <sup>2+</sup> +Mn)%		4.65	11.02	4.92	4.33	3.90	5.70	5.81	5.52	12.79
端员分子百分数	钙铬榴石 (Uv)	13.16	13.65	15.04	12.25	15.04	8.33	16.99	18.22	22.90
	钙铁榴石 (And)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	钙铝榴石 (Gro)	0.00	0.00	6.77	5.63	6.77	0.00	0.00	0.00	0.00
	锰铝榴石 (Spe)	0.56	1.20	0.73	0.44	0.73	0.63	0.80	0.73	0.79
	镁铬榴石 (Kno)	8.33	3.02	10.67	3.21	10.67	11.77	12.57	21.95	17.82
	镁铝榴石 (Pyr)	75.31	71.64	61.13	74.49	61.13	68.78	59.37	49.29	53.07
	铁铝榴石 (Alm)	1.43	7.00	4.70	0.00	4.70	9.34	8.97	7.68	0.69
	镍铁榴石 (Rho)	0.00	0.00	0.00	2.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	铁榴石 (Ski)	1.21	2.68	0.96	1.20	0.96	1.15	1.29	2.13	4.72
	组份数	钙组份	13.16	13.65	21.81	17.88	21.81	8.33	16.99	18.22
	铬组份	21.49	17.48	25.71	15.46	25.71	20.10	29.57	40.17	40.72
	镁组份	83.64	75.46	71.80	80.48	71.80	80.55	71.94	71.24	70.89
配入端员分子的阳离子百分数		93.83	96.01	98.77	96.67	98.77	99.19	98.01	98.02	94.92
产地		山东胜利 1 号岩筒					山东红旗 27 号岩脉			

分析者: 中国地质科学院矿床地质研究所杨明明

48—榴辉岩中石榴石, 其余均为金伯利岩中镁铝榴石; 除 50 号外, 其余序号同表 2。

续表

序号		23	28	40	41	47	42	50	48
内容									
氧化物 (重量%)	SiO <sub>2</sub>	41.80	41.58	40.27	40.43	42.35	40.90	41.98	39.10
	TiO <sub>2</sub>	0.00	0.07	0.23	0.35	0.18	0.20	0.10	0.00
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.14	15.83	13.37	12.37	22.52	12.68	20.24	22.21
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.70	10.68	12.45	13.37	1.45	13.79	4.37	0.13
	TFeO	6.31	5.89	7.96	5.88	8.63	6.63	7.52	23.74
	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.88	0.41	1.06	0.28	0.37	1.13	0.05	0.02
	(FeO)	5.52	5.53	7.01	5.63	8.29	5.61	7.47	23.72
	MnO	0.42	0.30	0.49	0.32	0.31	0.35	0.37	0.58
	MgO	22.67	19.75	15.99	17.81	20.42	17.35	20.12	8.56
	CaO	2.84	5.85	8.72	8.59	4.03	8.03	5.15	5.61
	Na <sub>2</sub> O	0.06	0.04	0.00	0.07	0.06	0.05	0.05	0.03
总计	99.94	99.99	99.48	99.19	99.95	99.98	99.90	99.96	
以O <sub>12</sub> 为基础 计算阳离子数	Si	2.982	3.025	3.021	3.028	3.009	3.036	3.012	2.993
	Ti	0.000	0.004	0.015	0.022	0.011	0.013	0.006	0.000
	Al	1.610	1.358	1.182	1.092	1.886	1.110	1.712	2.005
	Cr	0.378	0.614	0.738	0.792	0.081	0.809	0.248	0.008
	Fe <sup>3+</sup>	0.047	0.022	0.060	0.016	0.020	0.063	0.003	0.001
	Fe <sup>2+</sup>	0.329	0.336	0.440	0.353	0.493	0.349	0.448	1.510
	Mn	0.025	0.018	0.031	0.020	0.019	0.022	0.022	0.038
	Mg	2.411	2.141	1.787	1.988	2.162	0.920	2.152	0.077
	Ca	0.217	0.456	0.701	0.689	0.307	0.639	0.396	0.460
Fe <sup>2+</sup> /(Fe <sup>2+</sup> +Mg)%	12.02	13.57	19.74	15.07	18.56	15.37	17.24	60.86	
Cr/(Fe <sup>2+</sup> +Al)%	19.01	31.15	38.44	42.02	4.14	42.17	12.65	0.39	
Mn/(Fe <sup>2+</sup> +Mn)%	7.16	5.21	6.61	5.44	3.65	5.94	4.78	2.42	
端员分子百分数	钙铬榴石(Uv)	7.28	15.45	23.69	24.19	4.10	21.48	12.63	0.39
	钙铁榴石(And)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.01	0.00	0.15	0.05
	钙铝榴石(Gro)	0.00	0.00	0.00	0.00	5.19	2.83	0.67	14.93
	锰铝榴石(Spe)	0.85	0.63	1.05	0.71	0.63	0.74	0.76	1.26
	镁铬榴石(Kno)	11.73	15.76	13.74	17.48	0.00	19.35	0.00	0.00
	镁铝榴石(Pyr)	69.10	56.77	46.67	52.29	72.55	45.22	73.07	32.63
	铁铝榴石(Alm)	11.02	11.39	12.21	4.50	16.53	7.20	12.72	50.74
	镁铁榴石(Rho)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	铁榴石(Ski)	0.02	0.00	2.64	0.82	0.00	3.18	0.00	0.00
组份数	钙组份	7.28	15.45	23.69	24.19	10.29	24.31	13.45	15.37
	铬组份	19.01	31.21	37.42	41.68	4.10	40.83	12.63	0.39
	镁组份	80.83	72.54	60.41	69.77	72.55	64.56	73.07	32.63
配入端员分子的阳离子百分数		99.41	98.70	98.95	94.98	99.50	99.61	98.16	99.78
产地		辽宁50号岩筒			辽宁51号岩筒		辽宁30号岩筒	辽宁42号岩筒	辽宁50号岩筒

表2 石榴石的类型及其主要特征

Table 2. Types and major characteristics of garnet

No.	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	镁铝榴石*	钙铬榴石*	镁铬榴石*	d <sub>0</sub> (nm)	N	在图7中位置	在图6中位置	类型
1	0.28	7.17	5.40	22.20	4.86	75.31	13.16	8.33			A	II	
2	0.03	7.05	3.85	22.95	4.30	73.82	11.17	9.10			A	II	
3	0.13	5.83	4.58	20.03	5.04	71.64	13.65	3.82			A	II	
4	0.59	5.73	4.46	20.47	5.33	73.37	14.24	2.70			A	II	
5	0.42	8.95	5.10	20.13	5.62	62.78	14.88	11.34			A	II	
6	1.56	6.13	5.84	20.05	5.69	72.87	15.48	2.98			A	II	
7	0.13	7.45	6.24	19.71	5.47	64.77	14.38	7.29		1.773	A	II	
8	0.13	8.82	6.86	19.60	5.71	61.13	15.04	10.67	1.158	1.755	B	II	
9	0.13	7.22	6.63	19.46	5.66	64.07	14.66	6.04			B	II	
10	1.30	5.39	4.88	21.48	4.93	73.48	13.12	2.75			C	II	DG9
11	1.13	5.28	4.70	21.87	4.63	74.49	12.25	3.21		1.745	C	II	
12	0.73	4.19	5.80	20.31	4.88	74.66	12.25	0.00			C	II	
13	0.93	4.18	6.46	20.18	4.87	73.46	12.11	0.00			C	II	
14	0.24	4.01	6.34	19.75	4.87	73.02	11.80	0.00			C	II	
15	0.14	4.23	6.45	20.75	4.72	74.32	12.05	0.00			C	II	
16	0.41	3.58	7.74	19.51	5.39	61.13	15.04	10.67	1.155	1.740	D	II	
17	1.16	2.51	5.73	20.15	4.82	74.84	7.42	0.00			D	II	
18	0.30	1.98	5.89	22.33	3.76	78.79	5.56	0.00	1.153	1.735	E	II	
19	0.33	1.92	5.94	21.42	4.01	77.05	5.50	0.00		1.752	E	II	
20	0.07	7.02	5.19	22.38	3.22	68.78	8.33	11.77		1.766	A	I	
21	0.57	11.95	3.23	21.75	4.20	56.79	11.30	24.28			A	I	
22	0.11	16.41	5.48	20.55	3.86	38.64	10.44	38.69			A	I	DG10
23	0.00	6.70	5.52	22.67	2.84	69.10	7.28	11.73	1.765		A	I	
24	0.04	3.62	4.42	24.15	2.76	81.58	6.96	3.14			C	I	
25	0.14	10.28	5.33	18.67	6.22	56.62	16.92	14.03			A	I-II	
26	0.09	10.03	6.24	19.42	6.39	59.37	16.99	12.57		1.770	A	II	
27	0.17	9.99	5.47	19.52	6.29	58.92	16.56	12.54			A	I-II	
28	0.07	10.68	5.53	19.75	5.85	56.77	15.45	15.76	1.779		A	I	
29	0.04	10.61	6.03	19.60	5.86	56.09	15.37	15.43	1.778		A	I	DG11
30	0.05	10.13	4.53	19.92	6.03	59.97	16.05	13.79			A	I	
31	0.36	10.46	5.53	18.63	7.33	57.68	19.53	11.29			A	II	
32	0.14	7.58	5.74	14.29	13.10	53.57	22.61	0.00			B	III	
33	0.10	12.87	6.45	18.66	6.67	50.11	18.53	19.89			A	I-II	
34	0.81	14.62	5.18	17.53	7.34	43.11	20.36	24.52			B	II	
35	0.39	14.10	5.92	17.73	8.38	48.54	23.33	20.11			B	II	
36	0.18	13.35	5.89	18.84	6.70	49.29	18.22	21.95	1.781		B	I-II	
37	0.39	13.19	2.49	18.27	8.21	53.07	22.90	17.82			B	II	DG12
38	0.15	16.78	4.46	11.48	9.93	39.00	27.12	23.60			B	II	
39	0.26	16.43	4.61	16.65	9.87	40.27	26.78	22.55			B	II	
40	0.23	12.45	7.01	15.99	8.72	46.67	23.69	13.74			B	III	
41	0.35	13.37	5.63	17.81	8.59	52.29	24.19	17.48			B	II	
42	0.20	13.79	5.61	17.35	8.03	45.22	21.48	19.35			B	II	
43	1.83	1.42	8.36	20.41	4.70	76.94	4.29	0.00		1.730	E		
44	0.64	0.06	11.10	12.14	9.57	45.59	0.18	0.00	1.157	1.746	E		
45	0.00	0.00	25.52	7.28	6.47	28.33	0.00	0.00			E		DG1
46	0.07	0.08	17.64	11.84	7.01	44.01	0.24	0.00	1.156		E		DG5
47	0.18	1.45	8.29	20.42	4.03	72.55	4.10	0.00	1.153	1.751	E		
48	0.00	0.13	23.72	8.56	5.61	32.63	0.39	0.00	1.158	1.773	E		
49	0.14	0.06	28.39	3.67	7.12	14.64	0.19	0.00		1.780	E		

\* 石榴石的端员分子百分数。

1, 2, 3, 4, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 20—山东胜利1号岩筒; 5, 6, 17, 21, 24, 25, 26, 34, 35, 36, 37, 43, 44, 45—山东红旗27号岩脉; 22, 27—山东红旗1号岩脉; 18, 23, 28, 29, 38, 39, 40, 46—辽宁50号岩筒; 15, 30, 32, 41, 47—辽宁51号岩筒; 19—辽宁68号岩筒; 9, 33, 42—辽宁30号岩筒; 31—辽宁铁岭; (1—47, 金伯利岩中石榴石); 48—辽宁50号岩筒; 49—河北6号岩筒; (48, 49榴辉岩中石榴石)

## 二、石榴石的颜色指数

金伯利岩中镁铝榴石的颜色是重要的标型特征之一。一般将镁铝榴石的颜色分为紫色和橙色两个系列，实际上石榴石具有紫、蓝、青、绿、黄绿、黄、橙和红等多种颜色，肉眼很难准确地描述。因此，笔者用MPV-1显微光度仪测定石榴石的透射率色散值，然后采用以等能光源 $S_E$ 为照明的等值纵座标法计算颜色指数<sup>[4]</sup>，以达到定量描述石榴石颜色的目的。

由于金伯利岩中一些颜色较深的镁铝榴石颗粒细小，且极易破碎，曾试图将样品制成探针片，使其厚度基本一致后，再测定其透射率色散值，但由于颗粒过细且大小不一，薄片厚度很难达到完全统一，以致测定中会产生一定误差。但通过大量的（约测定80个）测试比较，测定的颜色与肉眼实际观察的结果基本一致。现将测试的部分石榴石的透射率色散值和颜色指数列于表3。

颜色本身的特征决定于亮度、色调和饱和度（纯度），颜色的种类一般以颜色色散曲线主峰值的波长数或颜色指数中的主波长（ $\lambda_d$ ）表示<sup>[4]</sup>。由表3可见，DG9组中含Cr较高的铬镁铝榴石以紫色为主，DG9组中含Cr较低的铬镁铝榴石主要为黄—橙色；DG10组为紫、红和紫红色；DG11组以紫、蓝绿和黄绿为主；DG12组为蓝绿、绿和紫色；DG1—DG5组为黄—橙色。与金刚石关系较密切的镁铝榴石多为紫、红、蓝绿等色。

表3还显示出，每个样品除主波长不同外，它们的亮度、饱和度也各不相同，因而石榴石实际上具有从紫色到红色光谱色的各种颜色。镁铝榴石颜色的变化与其 $Cr_2O_3$ 的含量有一定关系。DG9组中低铬的（ $Cr_2O_3 < 6\%$ ）镁铝榴石颜色较浅且变化小，而DG9中高铬的（ $Cr_2O_3 > 6\%$ ）镁铝榴石、DG10、DG11和DG12组大致随 $Cr_2O_3$ 含量由低→高，颜色由黄（橙）→红→紫→蓝→青→绿（图2）。

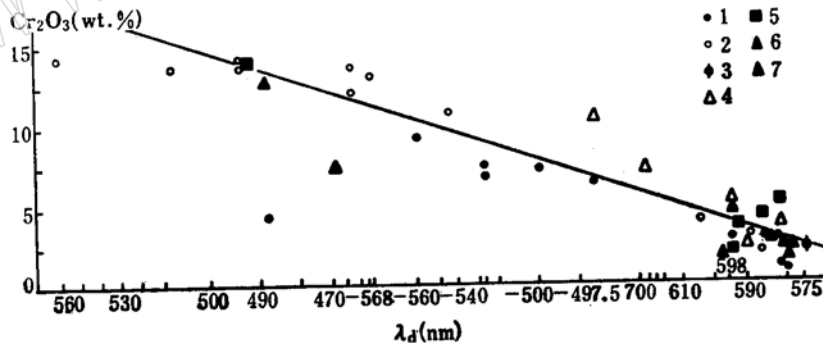


图2 石榴石 $Cr_2O_3$ 与 $\lambda_d$ 的关系

Fig. 2. Relations of  $Cr_2O_3$  in garnet with  $\lambda_d$

1—胜利1号；2—红旗27号；3—红旗1号；4—50号；5—51号；6—30号；7—68号（1—3，山东；4—7 辽宁）； $\lambda_d$ 负值为补色波长<sup>[5]</sup>

正象 Webster<sup>[6]</sup>所指出的，含有足够铁铝榴石分子（almandine）的镁铝榴石，当只有铁起致色作用时，呈现一种漂亮的淡紫—红色，但当铬进入铁铝榴石分子时就呈最鲜艳的血红色。含有钙铬榴石分子（uvarovite），即铬为必不可少的组份时，镁铝榴石就呈现最鲜艳的绿色。本次所测数十个金伯利岩中的镁铝榴石均含有一定数量的钙铬榴石和铁铝榴石分子，

表 3 石榴石的透射率色数值和颜色指数

Table 3. Transmittance dispersion values and color indices of garnet

No.	波 长 (nm)								颜 色 指 数 (SE)					类 型	
	405	436	480	526	546	589	644	656	<i>T<sub>vis</sub></i>	X	Y	$\lambda_d$	<i>P<sub>c</sub></i>		
1	8.9	14.6	50.8	30.8	15.9	19.2	67.8	73.3	27.0	0.344	0.308	-527	11.8	DG9	
2	0.0	0.2	1.4	0.9	0.5	0.4	2.8	3.5	0.83	0.394	0.295	-500	26.1		
3	8.3	10.2	33.4	24.0	14.3	16.7	56.4	60.7	22.1	0.370	0.326	-494	9.7		
4	8.2	6.1	20.7	18.2	11.8	14.1	43.5	46.9	17.3	0.396	0.347	596	22.7		
7	40.0	45.6	81.1	66.1	49.4	49.5	87.5	90.0	58.3	0.329	0.327	466	2.1		
8	16.7	17.2	61.6	39.6	20.7	20.9	75.3	80.6	31.2	0.330	0.312	-560	7.9		
10	25.0	27.1	52.2	52.1	44.5	47.9	80.0	83.0	50.8	0.370	0.360	582	18.9		
13	34.9	47.5	68.2	66.3	61.4	65.6	84.5	84.4	66.8	0.354	0.350	581	11.0		
14	11.8	24.1	45.7	44.1	37.3	47.8	77.4	80.8	44.6	0.379	0.355	587	20.2		
15	40.7	48.0	64.2	61.1	54.5	58.3	77.3	79.8	59.8	0.347	0.341	586	6.2		
16	60.0	61.5	70.8	68.8	59.3	50.8	55.3	56.1	58.8	0.308	0.327	595	4.7		
17	8.8	3.7	5.9	8.7	8.5	11.1	17.8	18.5	10.2	0.429	0.368	590	39.3		
18	12.6	21.6	47.3	41.7	33.1	41.2	81.1	84.8	42.8	0.382	0.350	591	19.6		
19	64.1	20.8	79.4	79.7	77.3	79.9	38.4	87.5	79.8	0.342	0.341	581	4.9		
20	24.6	34.1	69.6	49.5	33.9	33.7	84.5	86.6	46.0	0.340	0.318	-527	7.4		GD10
23	30.1	43.9	68.7	57.7	47.3	52.3	78.9	80.6	55.4	0.342	0.332	658	2.1		
24	34.5	40.5	57.9	51.4	43.6	50.4	76.0	79.0	51.4	0.352	0.335	604	6.2		
25	25.0	20.1	70.3	48.7	26.4	25.0	92.4	78.3	39.4	0.336	0.316	-545	7.3		DG11
26	17.4	18.6	52.7	42.2	28.0	26.4	71.5	76.8	35.9	0.346	0.336	489	9.2		
27	33.8	43.8	77.0	65.7	50.9	85.7	95.4	58.6	58.6	0.334	0.334	573	0.5		
28	35.5	46.4	76.9	59.7	55.7	53.5	83.8	86.8	59.6	0.337	0.333	-494	0.9		
29	34.7	31.4	56.0	53.2	43.5	43.6	67.3	67.8	48.4	0.345	0.349	575	8.2		
33	15.9	24.1	71.8	54.6	33.2	28.8	76.2	82.8	42.4	0.320	0.330	488	4.8	DG12	
34	9.3	5.7	38.9	34.7	17.4	11.4	54.4	67.5	23.5	0.336	0.353	561	6.9		
35	10.0	6.1	29.3	24.7	13.4	7.2	36.1	43.2	16.4	0.253	0.345	494	26.2		
36	21.4	24.3	68.6	50.7	31.9	30.0	80.3	85.6	41.7	0.330	0.327	-568	2.2		
37	8.8	4.3	20.2	16.4	9.1	6.6	24.9	29.0	11.8	0.327	0.341	509	2.0		
40	20.0	18.0	55.9	48.8	31.8	24.7	67.4	76.8	37.5	0.331	0.347	543	3.3		
41	48.7	30.0	63.9	55.6	38.2	32.0	68.7	76.5	44.0	0.320	0.334	492	4.5		
44	16.4	13.3	18.5	22.2	22.3	37.1	43.5	44.0	28.9	0.423	0.375	587	39.4	DG1   DG5	
45	9.1	5.3	5.0	7.5	10.0	14.1	19.4	19.9	11.4	0.443	0.380	588	47.4		
46	36.8	33.4	37.9	43.4	48.6	56.1	65.2	66.5	50.8	0.383	0.364	584	24.1		
47	32.9	35.5	50.7	45.5	38.6	44.8	60.0	62.2	44.8	0.347	0.337	595	5.2		
48	63.0	63.8	71.2	76.1	79.1	82.7	86.0	85.3	79.7	0.253	0.350	580	10.6		
49	61.0	56.7	58.1	64.7	69.8	77.8	81.1	85.7	71.6	0.364	0.354	583	15.5		

编号同表 2。

*T<sub>vis</sub>*—视觉透射率; X、Y—色度坐标;  $\lambda_d$ —主波长; *P<sub>c</sub>*—饱和度(或纯度); 一般波长在450(nm)以下为紫色, 450—480(nm)为蓝色, 480—510(nm)为青色(蓝绿), 510—550(nm)为绿色, 550—570(nm)为黄绿色, 570—590(nm)为黄色, 590—610(nm)为橙色, 610(nm)以上为红色<sup>(4)</sup>。

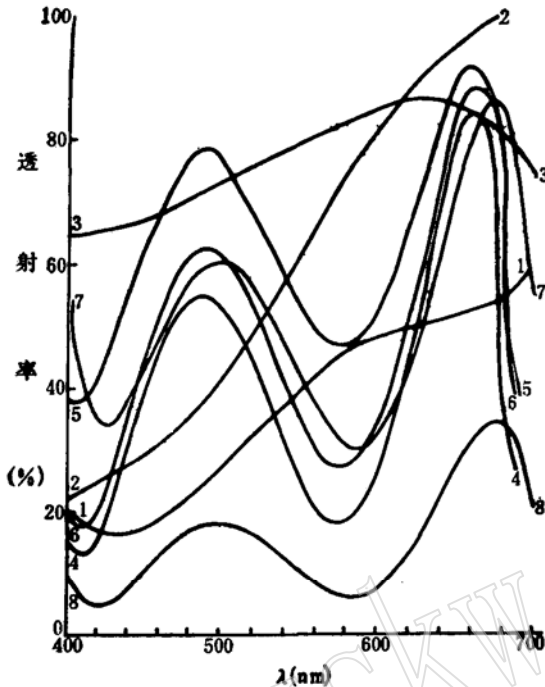


图3 石榴石透射率色散曲线

Fig. 3. Transmittance dispersion curve of garnet

因而可以认为，影响石榴石颜色变化的因素虽是多方面的，但从上述分析结果看， $Cr_2O_3$  和  $FeO$  的含量对镁铝石榴石的颜色起重要作用。

石榴石的颜色与光波之间有的为单一的对对应关系，但往往一种色光又可以由另外两种以上的色光混合匹配而成，如图3所示。图3中1、2、3三条色散曲线主峰值的波长数与颜色之间为单一的对对应关系，颜色均较浅，以黄、橙色为主；而3—8号透射率色散曲线均具有2—3个主峰值，即它们的颜色是由2—3种以上的色光混合匹配而成的，这种石榴石的颜色较深，如紫、蓝紫、蓝绿和绿色等。

### 三、石榴石的其他物理光学性质

#### 1. 红外吸收光谱

镁铝石榴石的红外吸收光谱图和吸收峰的波数分别见图4和表4。

镁铝石榴石在 $200-1100cm^{-1}$ 波长范围内一般有12个吸收峰，波数由大到小用I—XII表示。

表4 镁铝石榴石红外吸收谱带的波数

Table 4. Wave number of infrared absorption bands of pyrope

No.	吸收谱带波数 ( $cm^{-1}$ )			$Cr_2O_3$ (wt.%)	CaO (wt.%)	类型
	III	IV	V			
36	935		871	13.35	6.70	DG12
26	956		877	10.03	6.38	DG10
8	964	891	871	8.82	5.71	DG9
20	965	892	870	7.02	3.22	DG9
10	966	892	874	5.39	4.93	DG9
16	966	895	871	3.58	5.39	DG9
18	967	898	872	1.98	3.76	DG9
47	969	899	873	1.45	4.03	DG1

分析者：北京大学朱炜炯。序号同表2。36、26—山东红旗27号；8、20、10、16—山东胜利1号；18—辽宁50号；47—辽宁51号。



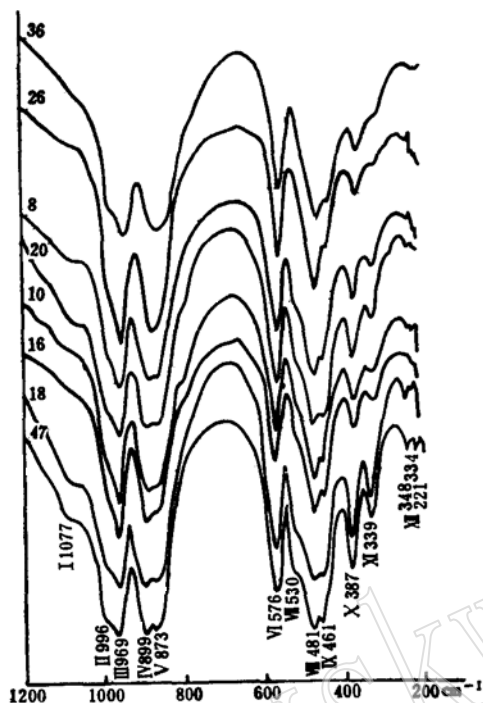


图4 镁铝榴石的红外吸收光谱

Fig. 4. Infrared absorption spectral of pyrope  
(序号同表4)

### 3. 折光率( $N$ )

镁铝榴石的折光率也具有随 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量升高而增大的趋势,如表2所示,含 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 最高的DG12组 $N$ 达到1.781,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量相对较低的DG9组 $N$ 可降到1.735, DG10、DG11组介于二者之间。铁铝榴石(DG3、DG5)的折光率与FeO含量变化密切相关, $N$ 大致随FeO含量升高而增大。

## 四、石榴石的成因探讨

目前一般认为金伯利岩中石榴石的成因主要有两种可能:(1)直接由金伯利岩岩浆结晶而成;(2)来源于深源捕虏体。深源捕虏体又分为两种组合:一是超基性岩组合(包括二辉橄榄岩、纯橄岩-方辉橄岩和异剥橄岩),二是榴辉岩组合。

本次研究样品除钙镁铝-铁铝榴石(DG3)和镁铁铝榴石(DG5)取自榴辉岩、少数铬镁铝榴石(DG9)直接取自金伯利岩的基质、斑晶(或捕虏晶)外,其余大部分为金伯利岩的重砂样。

将DG9、DG1-DG2组石榴石的Ca、Mg、 $\text{Fe}^{2+}$ 投入图5,显示出巨晶和二辉橄岩两种趋势。DG1、DG2和 $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 2.5\%$ 的DG9组(图中SHL)类似于Elwin Bay(ELWIN)巨晶石榴石。Mitchell等认为巨晶应为高压斑晶<sup>[7]</sup>,但目前尚无统一的认识。 $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 2.5\%$ 的DG9组类似于二辉橄岩捕虏体中的石榴石(图5中SIX)。

将 $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 2.5\%$ 的DG9、DG10、DG11和DG12组的镁铝榴石的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、CaO投入图6,

由图4和表4可见,由上→下镁铝榴石随 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量由高→低,吸收峰Ⅲ向波数增大的方向移动。吸收峰Ⅳ和Ⅴ在 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量较高(13.35%和10.03%)的36、26号样中二者简并,随着 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量降低,自8号样开始往下逐渐分裂为Ⅳ、Ⅴ两个峰,且吸收峰Ⅳ也随 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量的降低向波数增大的方向移动。

### 2. 粉晶X射线分析

石榴石的晶胞参数( $a_0$ )列于表2。

受样品所限仅对少数铬镁铝榴石(DG9)和几个铁铝榴石(DG3、DG5)进行了分析,初步显示出镁铝榴石的 $a_0$ 随 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量降低由1.158nm降到1.153nm;铁铝榴石的 $a_0$ 随FeO含量增加有增大的趋势。

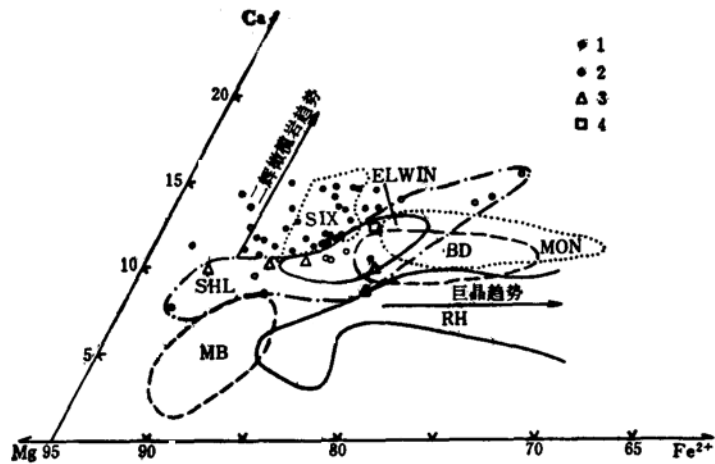


图5 镁铝榴石的变化趋势<sup>(7)</sup>

Fig. 5. Variation trend of pyrope

SIX—二辉橄榄岩趋势；ELWIN、MB、BD、MON、RH—不同地区的巨晶趋势；SHL—山东、辽宁巨晶范围。  
1—DG9(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>2.5%)；2—DG9(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub><2.5%)；3—DG1；4—DG2。

结果是，DG9组落入二辉橄榄岩区（II）；DG10组落入纯橄榄岩-方辉橄榄岩区（I）；部分

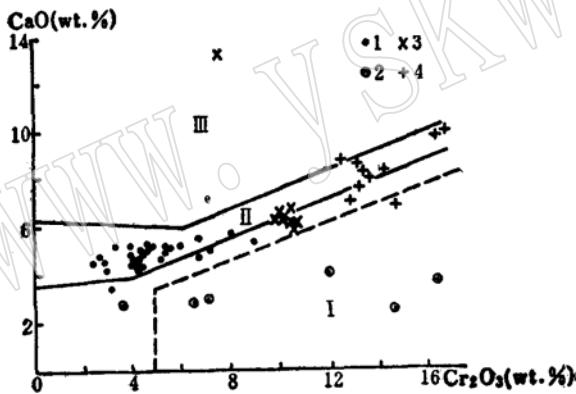


图6 镁铝榴石Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO图解<sup>(8)</sup>

Fig. 6. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO diagram of pyrope

1—DG9(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>2.5%)；2—DG10；3—DG11；4—DG12

I—纯橄榄岩-方辉橄榄岩区；II—二辉橄榄岩区；  
III—异剥橄榄岩区。

DG11和DG12组落在I-II过渡带上，其他落入II区，DG11和DG12各1个样落入异剥橄榄岩区（III）。可以认为DG9和大部分DG11、DG12组石榴石主要来源于二辉橄榄岩捕虏体，个别来源于异剥橄榄岩捕虏体。DG10组（包括金刚石中的镁铝榴石包裹体）主要来源于纯橄榄岩-方辉橄榄岩捕虏体。

Sobolev<sup>(9)</sup>提出，超基性岩组合中富钙的石榴石比贫钙的石榴石结晶晚，因此图6中三个区域石榴石的生成顺序由早到晚应为：I→II→III，即从总体看，DG10组形

成最早，DG12组形成相对较晚（落入III区的DG11属例外），其他介于二者之间。

### 五、石榴石与金刚石关系的判别

如何判别石榴石与金刚石的关系，即石榴石在金刚石找矿中的标型特征，许多研究者从不同的角度提出各自的判别方法。如Gurney<sup>(10)</sup>提出石榴石中Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO含量关系判别图解。将本次研究样品投入该图中，虽有部分含金刚石岩体中的石榴石落入与金刚石关系密切的区域，但象辽宁51、68和30号等含矿富-中等程度的岩体中的石榴石却落入与金刚石无成因关系区。另外，Irifune<sup>(11)</sup>所做的高温、高压实验证实，镁铬榴石分子是与石榴石的形成温度、

压力和深度关系密切的镁铝榴石的重要组成部分,所以作者用镁铝榴石中的铬、钙、镁三组份数绘制了石榴石与金刚石关系判别图解(图7)。

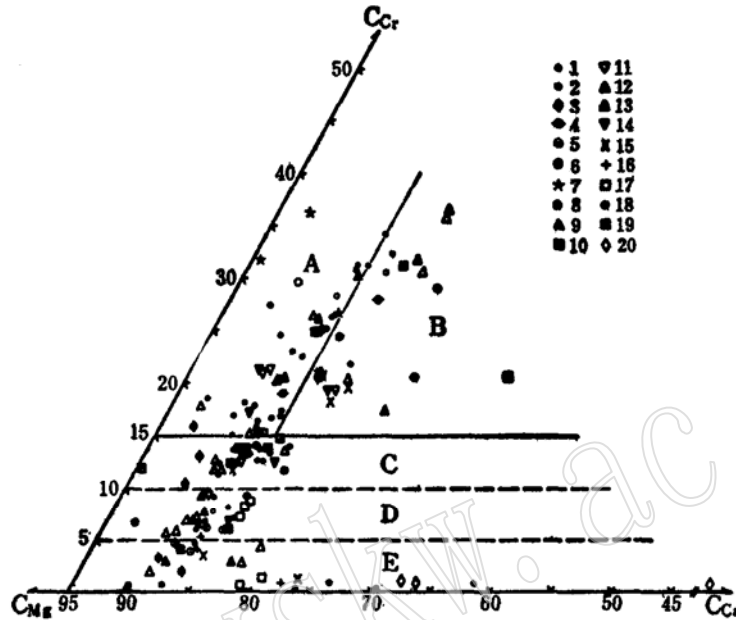


图7 石榴石Cr-Ca-Mg三组份判别图解

Fig. 7. Cr-Ca-Mg ternary discriminant diagram of garnet

1—胜利1号; 2—红旗27号; 3—红旗1号; 4—红旗23号; 5—红旗5号; 6—红旗28号; 7—金刚石中包裹体; 8—花马屯; 9—50号; 10—51号; 11—42号; 12—30号; 13—68号; 14—铁岭(1—8, 山东; 9—14, 辽宁); 15—贵州; 16—河南; 17—湖北; 18—河北; 19—山西; 20—辽宁、河北榴辉岩;  $C_{Cr}$ —Cr组份数,  $C_{Ca}$ —Ca组份数;  $C_{Mg}$ —Mg组份数。

图7根据大量样品统计结果,参考Gurney的图解,以一条斜线( $C_{Ca}=15\%$ )和三条平行线( $C_{Cr}=15\%$ ,  $10\%$ 和 $5\%$ )将图形分成五个区(A、B、C、D、E)。

将前述几个类型的石榴石按Cr、Ca、Mg组份数投入图7, DG10、DG11组绝大部分和 $Cr_2O_3$ 约 $>6\%$ 的DG9组铬镁铝榴石落入A区(见图7与表2)。这些镁铝榴石贫Ca( $C_{Ca}<15\%$ )富Cr( $C_{Cr}>15\%$ ),主要取自含金刚石富一中等的山东胜利1号,红旗1、27号及辽宁50、51、68、42、30号等金伯利岩岩体 $\bullet$ ,三个金刚石中的镁铝榴石包裹体 $\bullet$ 均落入A区,该区与金刚石的形成关系最密切。DG12组 $Cr_2O_3$ 含量最高( $C_{Cr}>15\%$ ),CaO含量中一高( $C_{Ca}>15\%$ ),落入B区,样品主要取自山东的红旗5、23、27、28号脉和辽宁50、51、42、30号岩筒及贵州东方1号岩体等 $\bullet$ 。C区主要为DG9组,  $C_{Cr}10-15\%$ ,一般 $C_{Ca}<15\%$ ,大部分取自上述含矿岩体,部分为不含矿岩体(如山西、河北等)。D区以DG9组为主,  $Cr_2O_3$ 含量低,  $C_{Cr}5-10\%$ ,  $C_{Ca}$ 同C区,样品除部分取自上述含矿岩体外,还有河南、湖北 $\bullet$ 和河北等非含矿岩体中的镁铝榴石也分布该区。E区除含 $Cr_2O_3<2.5\%$ 的DG9组外, DG1-DG5组(榴辉岩中的

$\bullet$ 其中部分分析结果引自山东地质局第七地质大队、山东地质局实验室, 1980。部分分析样品由辽宁地矿局第六地质大队提供。

$\bullet$ 其中2个分析结果引用包亚男资料, 1990。

DG3、DG5)也落入该区,它们含Cr低( $C_{Cr} < 5\%$ ),Ca组份变化范围大, $C_{Ca}$ 最高可达40%以上。

综上所述,A区镁铝榴石与金刚石的形成关系最密切。该区镁铝榴石的标型特征为:

1. 从类型上看,以铬镁铝榴石(DG9)、低钙-铬镁铝榴石(DG10)、钙铬-镁铝榴石(DG11)为主。
2. 化学成分特点是含铬较高,钙较低, $Cr_2O_3$ 一般为5.73—16.41%,CaO 3.22—6.38%,为含钙铬榴石、镁铬榴石分子较高的镁铝榴石(表2)。
3. 从颜色指数分析,它们的颜色以各种不同色调的紫、红色为主,部分是蓝绿、黄绿色等(表3)。
4. 折光率随 $Cr_2O_3$ 含量升高而增大, $N=1.765—1.779$ (表2)的镁铝榴石与金刚石关系密切。
5. 从成因上分析,可能主要来源于纯橄榄岩-方辉橄榄岩和二辉橄榄岩捕虏体。

本文为“华北地台金伯利岩及相关岩石与金刚石形成关系研究”项目的一部分。工作中得到辽宁省地矿局第六地质大队和山东省地矿局第七地质大队的大力协助,在此一并致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 胡 蓉, 1982, 金伯利岩中镁铝榴石端员分子计算方法的探讨。矿物学报, 第2期。
- [2] Dawson, J. B., Stephens, W. E., 1975, Statistical analysis of garnets from kimberlites and associated xenoliths. *J. Geol.* 83, 589-607.
- [3] K. H. 厄基绍夫著, 1984, 秦淑英等译, 金伯利岩形成的岩石+矿物模式。国外矿床地质, 1987年, 第4期, 78—79。
- [4] 陈 正等, 1979, 金属矿物颜色指数研究。地质出版社。
- [5] 荆其诚等编著, 1979, 色度学。科学出版社。
- [6] Webster, R., 1983. *Gems. Their Sources, Descriptions and Identification.* p. 683.
- [7] Mitchell, R. H., 1985. *Mineralogy, petrology and geochemistry of kimberlite.*
- [8] Л. Д. Харбкнв 著, 1978, 王艺芬译, 金刚石伴生矿物化学成分标型意义。国外地质, 1980, 第7期, 26—33。
- [9] Sobolev, N. V., 1974. Deep seated inclusion in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle. English translation edited By F. R. Boyd., 1977.
- [10] Gurney, J. J., 1985. A correlation between garnets and diamonds in kimberlites, In editors L. E. Clover & P. G. Harris, kimberlite occurrence and origin: A basis for conceptual models in exploration.
- [11] Irifune, T., 1985. Experimental study of the system  $Mg_3Al_2Si_2O_{12}-Mg_3Cr_2Si_3O_{12}$  at high pressure and high temperature. *Journal of the Faculty of Science Hokkaido University*, Vol. 21, No. 3 p. 449.

## Types, Typomorphic Characteristics of Garnet from Kimberlites in Shandong and Liaoning Province and Its Relationship with Diamond

Zhou Xiuzhong, Huang Yunhui, Qin Shuying, Gao Yan, Yang Jianmin

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of  
Geological Sciences, Beijing)

**Key words:** kimberlite; garnet; type; typomorphic characteristic; diamond

### Abstract

Pyrope in kimberlites is an important indicator mineral in search for diamond.

Electron microprobe analyses of garnet from kimberlites in Shandong and Liaoning were used to calculate its end member percentage and other chemical parameters by means of molecular number partitioning (Table 1). The transmittance dispersion values of garnet were determined by MPV-1 type microphotometer, and the color indices were calculated by equivalent ordinate method with equalenergy light source  $S_2$  as illumination means (Table 3). In this way, the colors of garnet have been described quantitatively. According to classification by Dawson and Stephens (1975), our studied samples are mainly chrome-pyrope(DG 9), and subordinately knorringite-uvarovite-pyrope(DG 12), uvarovite-pyrope(DG 11) and low-calcium chrome-pyrope (DG 10), with small amounts of titanium pyrope (DG 1) and magnesian almandine(DG 5).

A discriminant diagram showing relationship between garnet and diamond was drawn with Cr, Mg and Ca as components (Fig. 7), and this diagram can be divided into five areas (A, B, C, D and E). Pyrope falling into Area A has the closest relationship with diamond. The typomorphic characteristics of such pyrope are as follows:

1. Chrome-pyrope(DG 9), low-calcium chrome-pyrope(DG 10) and uvarovite-pyrope(DG 11) are dominant.

2. Chemically, it is relatively high in Cr and low in Ca(generally  $Cr_2O_3=5.73-16.41\%$  and  $CaO=3.22-6.38\%$ ), belonging to pyrope which contains fairly high uvarovite and knorringite members(Table 2).

3. Its color is mainly purple and red with various hues and, next, bluish green and yellowish green (Table 3).

4. Its refraction indices increase with increasing  $Cr_2O_3$  content, and pyrope with  $N$  1.765-1.779 is most closely related to diamond.

5. Genetically, it might have been mainly derived from xenoliths of dunitite-harzburgite and websterite.