

山东蒙阴金伯利岩中石榴石特征及种类划分

迟广成, 伍月, 胡建飞

(沈阳地质矿产研究所, 辽宁 沈阳 110032)

摘要:石榴石是山东蒙阴金伯利岩型金刚石矿区的重要指示矿物之一,为了确定山东蒙阴金刚石矿区颜色复杂的石榴石种类,判断矿区石榴石特征与含矿性关系。项目组对矿区不同含矿程度金伯利岩中的石榴石进行了系统采样,测定了50件单晶石榴石微区化学成分和128个石榴石单晶的晶胞参数,测试结果显示:山东蒙阴金伯利岩中石榴石族矿物化学式 $A_3B_2[SiO_4]_3$ 中的A组阳离子由 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Fe^{2+} 组成,二价阳离子主要为 Mg^{2+} , Mg^{2+} 占据十二面体空腔中心位置达53%~82%左右, Ca^{2+} 占据十二面体空腔中心位置小于7%~17%、 Fe^{2+} 占据十二面体空腔中心位置5%~31%左右。B组阳离子主要由 Al^{3+} 、 Cr^{3+} 和 Fe^{3+} 组成,三价阳离子主要为 Al^{3+} [AlO_6]八面体占比达62%~92%左右 [FeO_6 和 CrO_6]八面体占比小于38%。按50个石榴石不同阳离子占据十二面体空腔和八面体空腔的位置多少,山东蒙阴石榴石可划分为10个亚种。根据山东蒙阴金伯利岩中石榴石成分,计算出石榴石形成压力为6.0~9.0 GPa,推测山东蒙阴矿区金伯利岩中有来自深源的石榴石。128件石榴石晶胞参数统计结果显示:山东蒙阴无矿、贫矿、中等含矿、富矿金伯利岩岩体中紫色石榴石晶胞参数分别为大于1.162 nm、1.159~1.160 nm、1.156~1.160 nm和1.155~1.157 nm之间,从无矿岩体→贫矿岩体→中等含矿岩体→富矿岩体,紫色石榴石晶胞参数值有明显变小的趋势。

关键词: 山东蒙阴, 金伯利岩, 石榴石, 化学成分, 晶胞参数, 分类

中图分类号: P578.94⁺7; P573

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)05-0877-08

The characteristics and classification of garnets from kimberlite in Mengyin, Shandong Province

CHI Guang-cheng, WU Yue and HU Jian-fei

(Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110032, China)

Abstract: Garnet is one of the main indicator minerals of kimberlite type diamond deposits in Mengyin, Shandong Province. In order to determine the types of complex color garnets in diamond deposits of Mengyin and the relations between characteristics of garnet and ore potential, the research group systematically sampled the garnets in kimberlite of different mineralization degrees in ore deposits. The MgO, SiO₂, FeO, TiO₂, Al₂O₃, Cr₂O₃, CaO, MnO values of 50 single crystal garnets in the kimberlite were measured by electron microprobe spectrometer. 128 garnet single crystal lattice parameters were measured by X-ray single crystal diffraction. Some data were obtained: In the garnet, MgO values vary in the range of 14.44%~23.44%, SiO₂ 40.34%~43.64%, FeO 5.87%~16.97%, TiO₂ 0.00%~1.45%, Al₂O₃ 14.25%~22.30%, Cr₂O₃ 0.00%~11.88%, CaO 2.88%~6.68%, CaO/MgO ratios are in the range of 0.12~0.44, FeO/MgO 0.25~1.15, Cr₂O₃/Al₂O₃ 0.00~0.61, and TiO₂/Al₂O₃ 0.00~0.07. According to the above data, the garnets in kimberlite of Mengyin are probably of the magnesium, iron and calcium- aluminum chromium garnet series. In order to

收稿日期: 2013-09-27; 修订日期: 2014-08-04

基金项目: 国土资源部资助项目(200811120)

作者简介: 迟广成(1964-), 男, 高级工程师, 从事岩矿测试工作, E-mail: chiguangcheng@126.com。

divide types of the garnets in kimberlite, the authors calculated the formula of the 50 garnets according to the chemical composition, and the results show that the chemical formula of garnet group minerals in kimberlite is $A_3B_2[SiO_4]_3$. Group A cations are composed of Mg^{2+} , Ca^{2+} and Fe^{2+} . Divalent cation is mainly Mg^{2+} . Mg^{2+} occupies about 53%~82% of the dodecahedron cavity center. Ca^{2+} occupies less than 7%~17% of the dodecahedral cavity center. Fe^{2+} occupies around 5%~31% of the dodecahedron cavity center. Group B cations are composed of Al^{3+} , Cr^{3+} and Fe^{3+} . Trivalent cation is mainly Al^{3+} , with $[AlO_6]$ octahedra occupying up to some 62%~92%, and $[FeO_6]$ and $[CrO_6]$ octahedra occupying less than 38%. According to different cations that occupy dodecahedral cavities and octahedral cavities, garnets in Mengyin can be divided into 10 subspecies. According to Dawson-Stephens garnet classification methods, garnets in kimberlite of Mengyin are mainly of G9 and G10. The content of Cr_2O_3 in G9 garnets is low, the content of CaO is high, and iron chromium garnet end-member is characterized by a high percentage of molecules, with the color being mainly of purple series. G10 garnets are mainly in the coarse-grained kimberlite diamond, with a large number of diamond inclusion garnets belonging to this class, which reflects the genetic relation of coarse-grained garnet with diamond. G10 garnet may indicate the existence of diamond-bearing kimberlite body. According to the composition of garnets in kimberlite of Mengyin, the garnet of kimberlite in diamond of this area had formation pressure of 6.0~9.0 GPa. It is inferred that garnet in kimberlite of Mengyin should belong to asthenosphere. Lattice parameter statistics of 128 garnets show that lattice parameters of garnets from Mengyin are distributed in the range of 1.151~1.161 nm, with the frequency distribution in the range of 1.154~1.160 nm. Purple garnet lattice parameters indicating no ore, lean ore, medium ore-bearing rock and rich ore rock are 1.162 nm, 1.159~1.160 nm, 1.156~1.160 nm and 1.155~1.157 nm respectively. From barren rock through lean ore rock, medium ore-bearing rock, to rich ore rock, purple garnet lattice parameter values tend to decrease. Purple garnet cell parameters thus have obvious prospecting implications for kimberlite in Mengyin of Shandong Province.

Key words: Mengyin of Shandong; kimberlite; garnet; chemical composition; lattice parameter; classification

石榴石是山东蒙阴金伯利岩中金刚石的主要伴生矿物,矿物含量非常少,在五百多公斤的人工重砂中只能见到几粒,即使在含石榴石最多的金伯利岩岩管中,也只不过是数十粒。石榴石是寻找金伯利岩的主要标志型矿物之一(董振信,1991,1994),许多关于山东蒙阴金伯利岩中石榴石特征的论著,对石榴石晶胞参数、红外光谱和化学成分等进行了大量的探讨,却无人对该地石榴石的种类进行详细划分,一直把山东蒙阴金伯利岩中的石榴石当作镁铝榴石(董振信,1981;赵秀英,1988)。实际上山东蒙阴金伯利岩中石榴石的颜色和形态十分复杂,可能包含很多石榴石亚种,不详细界定石榴石的名称,将使石榴石的深入研究遇到难以克服的困难。建立石榴石种类划分方法,详细划分山东蒙阴金伯利岩中石榴石矿物种,是金伯利型金刚石矿床研究急需解决的问题。为了确定山东蒙阴金伯利岩中石榴石矿物种属,本次研究利用电子探针对山东蒙阴金伯利岩中石榴石化学成分 MgO 、 SiO_2 、 FeO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、 CaO 、 MnO 进行波谱分析,利用 X 射线

单晶衍射仪对 128 件石榴石进行晶胞参数测定,以期从根本上解决山东蒙阴金伯利岩中石榴石种类划分的问题,并探讨矿区石榴石化学成分、晶胞参数的指示特征。

1 地质背景及样品采集

山东省蒙阴金刚石矿田属金伯利岩型金刚石原生矿床,位于山东省蒙阴县,南起常马庄,北至坡里一带,矿化范围约 1 000 km^2 。矿田处于华北地台鲁西台背斜中心部位,郯庐断裂带东 40~70 km,次级北西向断裂发育。基底岩层为太古宇变质岩,岩浆岩除超基性浅成岩外,发育有中生代闪长岩、花岗闪长岩和一些小型脉岩;在矿化范围内发现百余个金伯利岩体,可划分为 3 个含金伯利岩矿带。蒙阴金刚石矿区 I 号矿带位于蒙阴矿田南端,蒙阴县城南联城乡王村-常马庄一带;II 号矿带位于蒙阴矿田中部,距蒙阴县城 15 km 的高都乡西峪村一带,与 I 号矿带相距 14 km,带长 12 km,宽 1.5~1 km,

沿 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 方向展布;Ⅲ号矿带位于矿田北部,蒙阴县城东北35 km的岱崮乡坡里一带,距Ⅱ号矿带约16 km,矿带由30条岩脉组成,沿 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 方向展布,部分岩脉含金刚石,但品位低,不具工业价值。蒙阴矿田的金刚石含矿性自南向北由富渐贫,Ⅰ号矿带富,Ⅱ号矿带中富,Ⅲ号矿带贫,在同一矿带中,中部岩脉(管)含矿富,两侧的岩体含矿贫,含矿性除与空间位置相关外,尚与金伯利岩体的岩性、岩石化学、围岩蚀变和空间分布有关,岩石中外来物质愈少,含镁铝石榴石愈多,含Ni、Co等微量元素愈高,围岩蚀变愈强,越近于矿体延深最大部位,含矿性愈高^{①②}。

在山东蒙阴金刚石矿区的红旗6号贫矿金伯利岩管、胜利2号中等含矿金伯利岩脉、胜利1号富矿小金伯利岩管、胜利1号中等含矿小金伯利岩管、胜利1号中等含矿金伯利大岩管中分别选取了6、13、9、8和14个石榴石样品,共计50件石榴石单晶样品做电子探针波谱分析。在山东蒙阴金刚石矿区胜利1号中等含矿金伯利小岩管、胜利1号中等含矿金伯利大岩管、胜利1号富矿金伯利小岩管、红旗6号贫矿金伯利岩管、胜利2号中等含矿金伯利岩脉,分别选取了43、46、28、1、10个石榴石样品,共计128件石榴石单晶做晶胞参数测定。

2 仪器及实验条件

石榴石微区化学成分由沈阳地质矿产研究所实验测试中心的日本电子公司生产的电子探针测定,仪器型号:JAX-8100,实验条件:室温 23°C ,湿度40%,加速电压15 kV,工作电流 $1\times 10^{-8}\text{A}$,工作距离11 mm,束斑直径 $1\ \mu\text{m}$ (郭立鹤,1986;曾毅等,2009)。在设定条件下,用电子探针波谱仪对所采石榴石样品进行微区分析,分析项目主要为:MgO、SiO₂、FeO、TiO₂、Al₂O₃、Cr₂O₃、CaO。

石榴石晶胞参数由中国地质大学(北京)的德国布鲁克公司生产的单晶X射线衍射仪(仪器型号:SMART APEX CCD)测定。实验条件为MoK_α射线,石墨单色器,晶体与CCD的距离50.017 mm,管压45 kV,管流35 mA。晶胞参数使用matrix方法测试,扫描范围:① 2θ 角为 -30° ,四圆衍射仪上的 φ 转轴设为 0° , ω 转轴设为 $-30^{\circ}\sim -45^{\circ}$;② 2θ 角为

-30° , φ 为 90° , ω 为 $-30^{\circ}\sim -45^{\circ}$;③ 2θ 角为 $+30^{\circ}$, φ 为 0° , ω 为 $+30^{\circ}\sim +15^{\circ}$,每个方向50帧,曝光时间10秒,大多数样品可获得200个以上衍射点用于晶胞参数的精修,晶胞参数精修使用全矩阵最小二乘精修方法,经全部的晶胞参数的误差统计表明,90%以上数据误差小于0.005,数据质量较好,所选晶体大小尽量保证在0.08~0.3 mm左右(Jenkins R,1980;李树堂,1993;刘粤惠等,2003;廖立兵等,2007)。

3 结果与讨论

3.1 石榴石颜色特征

山东蒙阴的128件石榴石样品颜色统计结果显示,石榴石颜色以黄色、橙红、橙黄、橙色、玫瑰红、浅玫瑰红、玫瑰色、玫瑰紫、大红、肉红、红色、粉红、粉色、紫青色为主,少量呈紫红、水红、浅橙红、淡玫瑰紫、肉色、浅橙黄、金黄、金红和褐色。山东蒙阴金伯利岩中的石榴石最显著特点就是颜色复杂,有紫-红-橙及其间各种过渡颜色,其中以紫红色最多,绿色-紫色石榴石虽然少见,却是含矿金伯利岩的特征矿物,无矿或贫矿金伯利岩中石榴石主要为深浅不一的紫红色。本地区非金伯利岩岩体中见到的石榴石多为淡粉红色或深红色,有时为橙红色,从未见到淡紫色或紫色的石榴石,即使在金伯利岩俘虏体中也未发现过紫色的石榴石(张安棣等,1991;董振信等,1993),玫瑰红、玫瑰紫和紫青色石榴石在本矿区具有标型意义。

3.2 石榴石化学成分特征

山东蒙阴金伯利岩中50件石榴石的主要化学成分(见表1):MgO含量为14.44%~23.44%,SiO₂含量为40.34%~43.64%,FeO含量为5.87%~16.97%,TiO₂含量为0.00%~1.45%,Al₂O₃含量为14.25%~22.30%,Cr₂O₃含量为0.00%~11.88%,CaO含量为2.88%~6.68%;其中CaO/MgO在0.12~0.44之间,FeO/MgO在0.25~1.15之间,Cr₂O₃/Al₂O₃在0.00~0.61之间,TiO₂/Al₂O₃在0.00~0.07之间。据化学成分测试结果,推测工作区石榴石为镁铁钙-铝铬石榴石系列(潘兆鲁,1985)。

山东蒙阴金伯利岩中的石榴石据表2的分类方

① 山东省地质局第七地质大队. 1972. 山东省蒙阴县金刚石矿王村矿区胜利1、2号地质勘探报告. 26~78.

② 山东省地质局第七地质大队. 1972. 山东省蒙阴县西峪金刚石矿区地质勘探报告. 1~98.

表1 石榴石电子探针波谱微区分析数据

 $w_B/\%$

Table 1 Electron probe spectrum microanalysis data of garnet

序号	送样号	MgO	SiO ₂	FeO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	CaO	Total
1	D25-1	22.78	43.01	7.83	0.31	21.75	0.97	4.33	100.98
2	D31	21.33	43.26	7.64	0.00	16.04	7.71	5.24	101.23
3	X1	22.85	42.83	6.75	0.39	19.25	3.44	4.49	99.99
4	X7	21.05	42.51	10.18	1.41	20.07	0.85	4.97	101.03
5	X9	22.33	42.85	7.25	0.16	20.26	3.11	4.72	100.68
6	X11	23.44	43.62	5.87	0.04	20.31	3.59	2.88	99.77
7	X12	20.67	42.69	8.82	0.65	19.96	3.44	5.04	101.27
8	X17	20.07	41.93	8.33	0.52	17.39	7.07	5.43	100.74
9	X27-1	19.68	42.73	7.16	0.16	17.66	6.00	6.04	99.45
10	X30	21.08	42.24	9.85	0.46	20.85	1.96	4.17	100.60
11	ws2-1	22.58	43.21	7.19	0.38	19.23	3.35	4.58	100.54
12	ws2-2	22.16	42.96	7.68	1.00	18.83	2.92	4.66	100.21
13	ws2-2-1	21.79	42.52	7.05	1.27	17.04	5.413	5.48	100.55
14	ws2-3	22.35	42.41	6.83	0.87	17.44	5.46	5.02	100.40
15	ws2-3-1	22.30	42.51	6.89	0.80	17.56	5.610	4.97	100.65
16	ws2-6	22.30	42.98	7.46	0.24	18.66	4.13	4.75	100.54
17	ws2-6-1	22.23	42.91	7.40	0.23	18.55	4.162	4.71	100.20
18	ws2-7	20.75	42.39	7.04	0.10	16.60	8.32	5.42	100.64
19	ws2-8	21.56	42.38	7.89	0.61	16.54	6.498	5.21	100.68
20	ws2-8-1	22.41	42.20	6.93	0.28	18.01	5.65	5.20	100.68
21	ws2-8-2	21.46	42.37	7.80	0.56	16.70	6.39	5.08	100.38
22	ws2-8-3	21.88	42.44	7.02	1.19	17.26	5.40	5.39	100.59
23	ws2-8-4	22.49	42.30	6.84	0.30	18.11	5.69	4.99	100.73
24	6-4	21.55	42.99	8.17	0.42	20.33	1.70	4.73	99.88
25	6-4-1	21.37	43.03	8.13	0.44	20.30	1.719	4.74	99.72
26	6-7-1	20.52	42.26	6.77	0.08	15.55	8.89	6.49	100.56
27	6-7-2	21.29	43.29	10.37	1.45	19.37	-	5.08	100.85
28	6-7-3	21.35	43.28	10.34	1.43	19.47	-	5.06	100.92
29	6-7-4	20.42	42.43	6.79	0.09	15.51	8.86	6.68	100.78
30	SX1-2-3	22.87	43.57	8.06	0.06	22.30	-	3.62	100.48
31	SX1-3-1	19.67	40.34	7.49	0.27	14.25	11.88	5.64	99.58
32	SX1-4	19.48	42.65	13.45	0.50	20.72	-	3.83	100.62
33	SX1-4-3	19.37	42.65	13.42	0.53	20.72	-	3.93	100.63
34	SX1-5	21.18	41.89	6.49	0.72	14.95	9.13	6.02	100.38
35	SX1-5-2	21.29	41.65	6.41	0.73	14.94	9.12	6.13	100.27
36	SX1-7-3	22.47	42.43	7.43	0.42	19.69	3.30	5.11	100.85
37	SX1-8-3	21.44	41.79	7.13	0.03	16.65	8.65	5.33	101.03
38	SX1-9-1	22.46	42.87	8.14	0.18	20.65	1.90	4.44	100.63
39	D1	23.06	42.23	6.12	0.40	17.20	6.39	5.05	100.45
40	D1-1	22.76	42.28	6.07	0.37	17.12	6.38	5.08	100.07
41	D5	22.47	42.97	7.58	0.47	19.93	2.70	4.69	100.81
42	D5-1	22.63	42.91	7.40	0.46	20.07	2.72	4.70	100.88
43	D7	21.47	42.33	8.28	0.19	20.58	2.82	4.48	100.16
44	D10	23.27	42.74	6.45	0.65	18.98	3.41	4.71	100.23
45	D14	14.44	41.21	16.97	0.34	21.17	0.02	6.24	100.40
46	D14-1	14.51	41.43	16.75	0.35	21.23	0.02	6.37	100.65
47	D16	21.43	43.54	5.96	0.69	18.22	4.31	5.04	99.21
48	D20	22.78	43.41	7.09	0.10	20.29	2.11	4.70	100.48
49	D20-1	22.87	43.64	7.09	0.10	20.31	2.12	4.63	100.75
50	D25	22.55	42.91	7.74	0.31	21.76	0.97	4.46	100.90

案,可分为 3 类:① G9 类石榴石,含 Cr₂O₃ 低、CaO 高,以钙镁铝石榴石端员分子百分数高为特征,颜色以紫色系列为主;② G10 类石榴石,含 Cr₂O₃ 高、CaO 低,以铁铬榴石端员分子百分数高为特征,其颜色为深紫色;③ G11 类石榴石,含 Cr₂O₃ 高、CaO 高。山东蒙阴金伯利岩中石榴石以 G9、G10 类为主,G10 类石榴石主要产于含金刚石金伯利岩粗晶石榴石

中,有大量金刚石包体的石榴石属于该类,反映出这些粗晶石榴石同金刚石的成因关系密切。因此,G10 类石榴石可指示含金刚石金伯利岩岩体的存在。

3.3 石榴石端员组分特征及种类划分

为了详细划分山东蒙阴金伯利岩中石榴石类型,据 50 件石榴石电子探针微区化学成分分析结果,计算出(王璞等,1982)所有石榴石分子式(见表 3)。

表 2 Dawson-Stephens 分类中的各类石榴石的不同产状及特征氧化物平均值

$w_B/\%$

Table 2 Oxide averages of garnets of different modes of occurrence in Dawson-Stephens classification

类别	名称	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	产状
G1	钛-镁铝榴石	0.58	1.34	9.32	20.0	4.82	K, GL, GOW, D
G2	高钛-镁铝榴石	1.09	0.91	9.84	20.3	4.52	K
G3	钙-镁铝-铁铝榴石	0.31	0.30	16.49	13.35	6.51	K, GL, GOW, EC, D
G4	钛、钙、镁-铁铝榴石	0.90	0.08	17.88	9.87	9.41	K, EC, D
G5	镁-铁铝榴石	0.05	0.03	28.23	7.83	2.44	K, EC, D
G6	镁铝榴石-钙铝榴石-铁铝榴石	0.24	0.27	10.77	10.38	14.87	GP, EC, GR
G7	铁-镁-钙铬榴石-钙铝榴石	0.29	11.52	5.25	8.61	21.60	K, GS
G8	铁-镁-钙铝榴石	0.25	0.04	6.91	4.69	24.77	GR
G9	铬镁铝榴石	0.17	3.47	8.01	20.01	5.17	K, GL, GOW, GH, EC, D
G10	低钙-铬-镁铝榴石	0.04	7.73	6.11	23.16	2.13	K, GS, D
G11	钙铬榴石-镁铝榴石	0.51	9.55	7.54	15.89	10.27	K, GL, GWH, D
G12	镁铬榴石-钙铬榴石-镁铝榴石	0.18	15.94	7.47	15.40	9.51	K, GS

注:K—金伯利岩;GL—石榴二辉橄岩;GH—石榴方辉橄岩;GS—石榴蛇纹岩;GOW—石榴橄橄二辉岩;GP—石榴辉岩;GWH—石榴异剥橄岩;GR—辉榴蓝晶岩;EC—榴辉岩;D—金刚石包体。数据引自 Farmer(1974)。

表 3 蒙阴金伯利岩中石榴石分子式特征及分类表

Table 3 Formula characteristics and types of garnet in kimberlite from Mengyin

采样地点	样数	分子式	类型	含矿
胜利 2 号脉	13	(Mg _{2.38} Ca _{0.35} Fe _{0.27}) _{3.00} (Al _{1.60} Cr _{0.19} Fe _{0.16} Ti _{0.02}) _{1.97} Si _{3.06} O ₁₂	I	中等
胜利 1 号小岩管	4	(Mg _{2.42} Ca _{0.34} Fe _{0.24}) _{3.00} (Al _{1.61} Cr _{0.19} Fe _{0.16} Ti _{0.02}) _{1.98} Si _{3.04} O ₁₂	I	中等
胜利 1 号小岩管	1	(Mg _{2.23} Fe _{0.39} Ca _{0.38}) _{3.00} (Al _{1.68} Fe _{0.21} Ti _{0.08} Cr _{0.05}) _{2.02} Si _{3.02} O ₁₂	V	中等
胜利 1 号小岩管	1	(Mg _{2.46} Fe _{0.32} Ca _{0.22}) _{3.00} (Al _{1.69} Cr _{0.20} Fe _{0.03}) _{1.91} Si _{3.07} O ₁₂	VI	中等
胜利 1 号小岩管	1	(Mg _{2.18} Fe _{0.44} Ca _{0.38}) _{3.00} (Al _{1.67} Cr _{0.19} Fe _{0.08} Ti _{0.03}) _{1.97} Si _{3.03} O ₁₂	VII	中等
胜利 1 号小岩管	1	(Mg _{2.24} Fe _{0.44} Ca _{0.32}) _{3.00} (Al _{1.75} Fe _{0.15} Cr _{0.11} Ti _{0.02}) _{2.03} Si _{3.01} O ₁₂	VIII	中等
红旗 6 号岩管	1	(Mg _{2.20} Ca _{0.52} Fe _{0.28}) _{3.00} (Al _{1.32} Cr _{0.51} Fe _{0.13} Ti _{0.01}) _{1.97} Si _{3.06} O ₁₂	I	贫矿
红旗 6 号岩管	1	(Mg _{2.29} Ca _{0.36} Fe _{0.35}) _{3.00} (Al _{1.71} Fe _{0.14} Cr _{0.10} Ti _{0.02}) _{1.97} Si _{3.06} O ₁₂	II	贫矿
红旗 6 号岩管	1	(Mg _{2.21} Ca _{0.50} Fe _{0.29}) _{3.00} (Al _{1.33} Cr _{0.51} Fe _{0.12}) _{1.96} Si _{3.06} O ₁₂	III	贫矿
红旗 6 号岩管	2	(Mg _{2.26} Ca _{0.39} Fe _{0.35}) _{3.00} (Al _{1.63} Fe _{0.26} Ti _{0.08}) _{1.97} Si _{3.07} O ₁₂	IV	贫矿
红旗 6 号岩管	1	(Mg _{2.27} Fe _{0.37} Ca _{0.36}) _{3.00} (Al _{1.71} Fe _{0.11} Cr _{0.10} Ti _{0.02}) _{1.94} Si _{3.07} O ₁₂	VIII	贫矿
胜利 1 号小岩管	3	(Mg _{2.17} Ca _{0.45} Fe _{0.38}) _{3.00} (Al _{1.24} Cr _{0.70} Fe _{0.08} Ti _{0.01}) _{2.03} Si _{2.99} O ₁₂	I	富矿
胜利 1 号小岩管	2	(Mg _{2.37} Ca _{0.39} Fe _{0.24}) _{3.00} (Al _{1.64} Fe _{0.20} Cr _{0.18} Ti _{0.02}) _{2.04} Si _{3.01} O ₁₂	II	富矿
胜利 1 号小岩管	1	(Mg _{2.30} Ca _{0.41} Fe _{0.29}) _{3.00} (Al _{1.41} Cr _{0.49} Fe _{0.14}) _{2.04} Si _{3.00} O ₁₂	III	富矿
胜利 1 号小岩管	1	(Mg _{2.09} Fe _{0.62} Ca _{0.29}) _{3.00} (Al _{1.75} Fe _{0.19} Cr _{0.10} Ti _{0.03}) _{1.97} Si _{3.06} O ₁₂	VIII	富矿
胜利 1 号小岩管	1	(Mg _{2.39} Fe _{0.34} Ca _{0.27}) _{3.00} (Al _{1.84} Fe _{0.13}) _{1.97} Si _{3.05} O ₁₂	IX	富矿
胜利 1 号小岩管	1	(Mg _{2.07} Fe _{0.63} Ca _{0.30}) _{3.00} (Al _{1.75} Fe _{0.18} Ti _{0.03}) _{1.96} Si _{3.06} O ₁₂	X	富矿
胜利 1 号大岩管	3	(Mg _{2.46} Ca _{0.39} Fe _{0.15}) _{3.00} (Al _{1.45} Cr _{0.36} Fe _{0.22} Ti _{0.02}) _{2.05} Si _{3.02} O ₁₂	I	中等
胜利 1 号大岩管	7	(Mg _{2.37} Ca _{0.35} Fe _{0.28}) _{3.00} (Al _{1.66} Fe _{0.17} Cr _{0.15} Ti _{0.03}) _{2.01} Si _{3.03} O ₁₂	II	中等
胜利 1 号大岩管	1	(Mg _{2.27} Ca _{0.40} Fe _{0.33}) _{3.00} (Al _{1.35} Cr _{0.44} Fe _{0.13}) _{1.92} Si _{3.09} O ₁₂	III	中等
胜利 1 号大岩管	1	(Mg _{2.28} Fe _{0.38} Ca _{0.34}) _{3.00} (Al _{1.73} Cr _{0.16} Fe _{0.11} Ti _{0.01}) _{2.01} Si _{3.02} O ₁₂	VII	中等
胜利 1 号大岩管	2	(Mg _{1.59} Fe _{0.92} Ca _{0.49}) _{3.00} (Al _{1.84} Fe _{0.13} Ti _{0.02}) _{1.99} Si _{3.04} O ₁₂	X	中等

山东蒙阴金伯利岩中石榴石族矿物化学式 $A_3B_2[SiO_4]_3$ 中的 A 组阳离子为 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Fe^{2+} ，二价阳离子主要为 Mg^{2+} ， Mg^{2+} 占位数为 1.59~2.46， Mg^{2+} 占据十二面体空腔中心位置达 53%~82% 左右， Ca^{2+} 占位数为 0.22~0.52， Ca^{2+} 的离子半径较大，虽然难以与其他二价阳离子置换，但在蒙阴金伯利岩石榴石中，同其他二价阳离子置换普遍， Ca^{2+} 占据十二面体空腔中心位置达 7%~17% 左右， Fe^{2+} 占位数为 0.15~0.92， Fe^{2+} 占据十二面体空腔中心位置 5%~31% 左右。B 组阳离子为 Al^{3+} 、 Cr^{3+} 和 Fe^{3+} ， Al^{3+} 占位数为 1.24~1.84， Fe^{2+} 占位数为 0.03~0.27， Cr^{3+} 占位数为 0.00~0.70， Ti^{3+} 占位数为 0.00~0.08，三价阳离子主要为 Al^{3+} [AlO_6] 八面体占位达 62%~92% 左右， $[FeO_6]$ 和 $[CrO_6]$ 八面体占位小于 38%。

山东蒙阴金伯利岩中石榴石的端员组分主要为镁铝榴石(Pyr)分子(占 72%~79%)，其它端员组分的含量因颜色系列不同而有一定差异。其中一个明显的差异是紫色系列者不含或少含钙铝榴石(Gr)分子，而橙色系列者含钙铝榴石分子可达 7.6%，深紫色铁铝榴石主要由镁铝榴石(Pyr)、铁铝榴石(Alm)、钙铬榴石(Uva)和铁铬榴石(Kn) 4 种端员分子组成，其颜色越深，含铁铬榴石和钙铬榴石分子越高，浅紫色石榴石主要由镁铝榴石(Pyr)和钙铬榴石(Uva)两种端员分子组成，其它端员分子都在 10% 以下，粉红色石榴石主要由镁铝榴石(Pyr)和铁铝榴石(Alm)两种端员分子组成。

山东蒙阴金伯利岩中电子探针分析的 50 个石榴石按不同阳离子占据十二面体空腔和八面体空腔的位置多少可划分为(Nesse, 2004) 10 个亚种(见表 3): I 型为镁钙铁-铝铬铁钛榴石亚种 24 件; II 型为镁钙铁-铝铁铬钛榴石亚种 10 件; III 型为镁钙铁-铝铬铁榴石亚种 3 件; IV 型为镁钙铁-铝铁钛榴石亚种 2 件; V 型为镁铁钙-铝铁钛榴石亚种 1 件; VI 型为镁铁钙-铝铬铁榴石亚种 1 件; VII 型为镁铁钙-铝铬铁钛榴石亚种 2 件; VIII 型为镁铁钙-铝铁铬钛榴石亚种 3 件; IX 型为镁铁钙-铝铁榴石亚种 1 件; X 型为镁铁钙-铝铁钛榴石亚种 3 件。

3.4 石榴石晶体结构特征及晶胞参数

蒙阴金伯利岩中石榴石晶体结构属等轴晶系，空间群 $O_h^{10}-Ia\bar{3}d$ ， $a_0 = 1.151 \sim 1.161$ nm， $Z = 8$ ，单位晶胞较大。[SiO_4] 四面体为 B 组阳离子的八面体 [AlO_6]、 $[FeO_6]$ 、 $[CrO_6]$ 所连接。其间形成较大的十

二面体空腔，可视为畸变的立方体，其中心位置为 A 组阳离子 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等占据，配位数为 8。石榴石的晶体结构(见图 1)中 1 个 [AlO_6] 八面体与周围 6 个 [SiO_4] 四面体以共角顶相连接，而与 Mg 的畸变立方体以共棱方式相连，每个 O 与 1 个 Al 和 1 个 Si 相连，并与 2 个稍远的 Mg 相连。因而石榴石结构比较紧密，其中以沿 L^3 轴方向最紧密，也是化学键最强的方向。类质同像代替可引起晶格常数 a_0 的变化，当 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 升高时， a_0 减小； Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 含量升高， a_0 明显增大。石榴石中八配位的 A 位阳离子半径和晶胞参数 a 与矿物形成时的压力关系密切，按配位理论，较大的阳离子 Ca^{2+} 呈八配位时所需要的压力不大，较小的 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 呈八配位时所需要的压力则依次增大(William, 1991)。

项目组在山东蒙阴金伯利岩中选了 128 件石榴石样品，利用 X 射线单晶衍射仪进行晶胞参数测定，结果显示(见图 2): 石榴石总体的晶胞参数分布于 1.151~1.161 nm 之间，频数分布集中区间为 1.154~1.160 nm。山东蒙阴不同岩体中的石榴石晶胞参数的分布规律也不一致，胜利 1 号中等含矿小岩管金伯利岩中石榴石的晶胞参数多分布在 1.154~1.162 nm 之间，分布比较集中，晶胞参数在 1.157~1.158 nm 之间出现频数较大，蒙阴胜利 1 号中等含矿大岩管金伯利岩中石榴石晶胞参数多分布在 1.154~1.163 nm 之间，分布比较分散；蒙阴胜利 1 号富矿小岩管金伯利岩中石榴石晶胞参数多分布在 1.151~1.161 nm 之间，分布比较集中，晶胞参数在 1.155~1.160 nm 之间出现频数较大；蒙阴胜利 2 号中等含矿金伯利岩中石榴石晶胞参数多分布在 1.152~1.159 nm 之间，分布较分散。

山东蒙阴不同含矿程度金伯利岩岩体中 128 件石榴石单晶晶胞参数统计表明：山东蒙阴无矿、贫矿、中等含矿、富矿金伯利岩岩体中紫色石榴石晶胞参数分别为大于 1.162 nm、1.159~1.160 nm、1.156~1.160 nm 和 1.155~1.157 nm 之间；从无矿岩体→贫矿岩体→中等含矿岩体→富矿岩体，紫色石榴石晶胞参数值有明显变小的趋势。

3.5 石榴石成因探讨

一般认为金伯利岩中石榴石主要有 3 种成因：① 直接由金伯利岩岩浆结晶而成，② 来源于深源捕虏体，③ 地幔捕虏体组成矿物经解离被金伯利岩岩浆捕虏进入金伯利岩(贺灌之, 1980)。

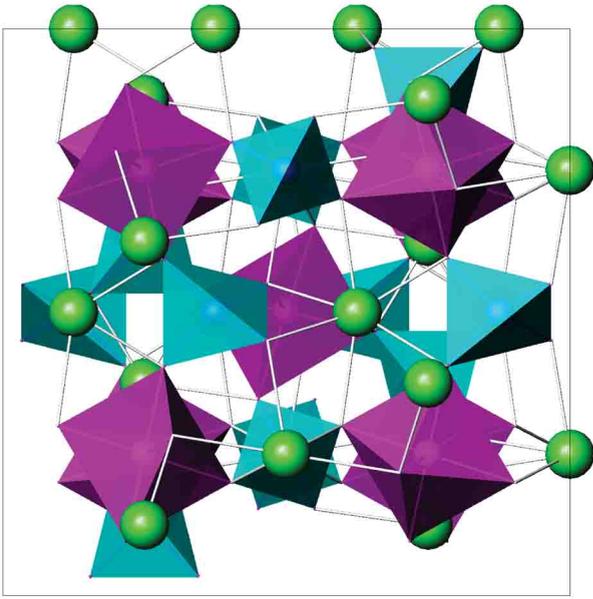


图 1 金伯利岩中石榴石晶体结构图

Fig. 1 Typical crystal structure of garnet from Wafangdian of Liaoning

球体代表 Ca、Mg 等阳离子，八面体为 [AlO₆]、[FeO₆]、[CrO₆]，四面体为 [SiO₄]

spheres represent Ca, Mg and some other cations, octahedra stand for [AlO₆], [FeO₆], [CrO₆], tetrahedra for [SiO₄]

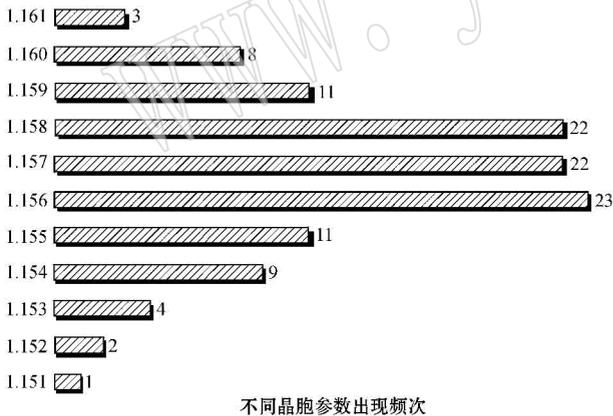


图 2 山东蒙阴金伯利岩中石榴石晶胞参数统计图

Fig. 2 Crystal cell parameters statistics of garnet from Mengiyin, Shandong

高温高压实验表明，石榴石的形成压力随着镁铬榴石分子含量的增加而升高(路凤香, 1996)，在镁铝榴石-钙铝榴石-钙铬榴石体系中，当温度为 1 200℃，压力为 3 GPa 时，将发生部分混溶，在镁铝榴石-镁铬榴石混溶相中，镁铬榴石分子含量为 2%~8%，当温度压力增高时，镁铬榴石混溶比例增加，在温度保持 1 200℃，压力增至 5 GPa 时，石榴石中的

镁铬榴石分子可达 25%。山东蒙阴含矿金伯利岩中石榴石的镁铬榴石分子已达 28.2%，表明其形成压力至少在 5 GPa 以上。

山东蒙阴金伯利岩中的石榴石形成压力可以从成分和结构测定两个方面来推断：镁铁铝榴石是一种地幔深度下稳定的矿物(张鸿翔等, 2000)，成分上以高 SiO₂ 为特色，可以计算出含有若干 mol 的镁铁榴石 [Mg₃(Fe, Al, Si)₂(SiO₄)₃] 组分。有实验资料证明压力越大(张铭杰等, 1999)，石榴石中越能容纳愈多的 MgSiO₃ 成为镁铁榴石 [Mg₃(Fe, Al, Si)₂(SiO₄)₃] 的组分，它的晶体化学式可以写成 Mg₃Si₃O₁₂，从晶体化学式可见，有 1:4 的硅原子是六配位的。用 Kenneth(郑建平等, 1994)提出的石榴石形成压力的计算公式： $p(\text{GPa}) = -50.7 + 18.97(\text{Si})$ 和 $p(\text{GPa}) = 23.7 - 9.06(\text{Al} + \text{Cr})$ ，代入山东蒙阴金伯利岩中石榴石的分子式中相应阳离子数，对山东蒙阴金伯利岩中石榴石形成的压力进行估算，计算结果与前人资料(庄德厚, 1979)对比显示，山东蒙阴金伯利岩中的石榴石形成压力在 6.0~9.0 GPa 之间，估计石榴石形成深度大于 200 km，推测山东蒙阴金伯利岩中石榴石形成于地幔软流圈。

有关资料显示(张培元等, 1980)，我国金伯利岩与深切地幔的大断裂有关，山东蒙阴金伯利岩分布于郯庐大断裂带西侧的次级断裂之中，距其主断裂 75~100 km，属古生代加里东晚期的产物，年龄约 450~494 Ma，郯庐断裂走向北东 15°~85°，倾角 50°~85°，据地球物理探测，该断裂已切穿了上地幔，进入软流圈，对金刚石矿的形成和演化起到了重要的控矿作用。

4 结论

(1) 山东蒙阴金伯利岩中石榴石的颜色以紫色系列为主，少量为橙色系列，玫瑰红、玫瑰紫和紫青色石榴石在本矿区具有标型意义；研究发现，从无矿岩体→贫矿岩体→中等含矿岩体→富矿岩体，金伯利岩中玫瑰紫色石榴石晶胞参数值有明显变小的趋势。

(2) 山东蒙阴金伯利岩中石榴石属橄榄岩型组合；按不同阳离子占据十二面体空腔和八面体空腔的位置多少山东蒙阴金伯利岩中石榴石可划分为 10 个亚种。根据石榴石成分计算其形成压力为 6.0~9.0 GPa，相当于形成于地幔软流圈的位置，推测山东蒙阴矿区金伯利岩中有来自深源的石榴石。

References

- Dong Zhenxin. 1981. Pyrope of kimberlite and other rocks [J]. Acta Geologica Sinica , 4 : 219~229 (in Chinese).
- Dong Zhenxin. 1991. Geological characteristics and prospecting signs type of kimberlite diamond deposits [J]. Mineral Deposits , 10 (3) : 255~264 (in Chinese).
- Dong Zhenxin. 1994. China Kimberlite [M]. Beijing : Science Press , 22~276 (in Chinese).
- Dong Zhenxin , Cong Andong and Han Zhuguo. 1993. The mineralogical indicators of diamond-bearing kimberlite [J]. Mineral Deposits , 12 (1) : 47~54 (in Chinese).
- Farmer V C. 1974. Infrared Spectra of Minerals [J]. Mineralogical Society , 1 : 21~76.
- Guo Lihe. 1986. The Geochemical Experimental Methods and Techniques and Geo Applications of Modern Mineralogical [M]. Beijing : Geological Publishing House , 1~19 (in Chinese).
- He Guanzhi. 1980. The formation mechanism of kimberlite and diamond [J]. Geological Review , 26 (5) : 25~28 (in Chinese).
- Jenkins R. 1980. Advances in X-ray Analysis [M]. New York : Plenum Press , 279.
- Li Shutang. 1993. X-ray Diffraction Method [M]. Beijing : Metallurgical Industry Press , 50~128 (in Chinese).
- Liao Libing and Li Guowu. 2007. X-ray Diffraction Methods and Applications [M]. Beijing : Geological Press , 63~81 (in Chinese).
- Liu Yuehui and Liu Ping'an. 2003. The Analysis Principles and Applications of X-ray Diffraction [M]. Beijing : Chemical Industry Press , 72~77 (in Chinese).
- Lu Fengxiang. 1996. Deep mantle and deep fluid [J]. Earth Science Frontiers , 3 (4) : 181~186 (in Chinese).
- Nesse W D. 2004. Introduction to Optical Mineralogy [M]. Oxford : Oxford University Press , 2~20.
- Pan Zhaolu. 1985. Crystallography and Mineralogy [M]. Beijing : Geological Publishing House , 257~258 (in Chinese).
- Wang Pu , Pan Zhaolu and Weng Lingbao. 1982. System Mineralogy (1) [M]. Beijing : Geological Publishing House , 160~188 (in Chinese).
- William D N. 1991. Introduction to Optical Mineralogy [M]. New York : Plenum Press , 11~36.
- Zeng Yi , Wu Wei and Gao Jianhua. 2009. The Foundation and Application of Scanning Electron Microscopy and Electron Microprobe [M]. Shanghai : Shanghai Science and Technology Press , 50~96 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Anli , Xie Xilin and Guo Lihe. 1991. Research and Database of Prospecting Diamond Indicator Mineral [M]. Beijing : Beijing Science and Technology Press , 66~89 (in Chinese).
- Zhang Hongxiang , Xu Zhifang , Huang Zhilong , et al. 2000. The basic characteristics and causes of mantle fluid [J]. Geology-Geochemistry , 28 (2) : 127 (in Chinese).
- Zhang Mingjie , Wang Xianbin , Liu Gang , et al. 1999. The fluid composition of Cenozoic basalts and mantle xenoliths East of China [J]. Acta Geologica Sinica , 73 (2) : 162 (in Chinese).
- Zhang Peiyuan , Qi Yuxing and Hu Hongqiang. 1980. The formation geological conditions of diamond-bearing kimberlite in Liaoning [J]. Geological Review , 26 (1) : 21~27 (in Chinese).
- Zhao Xiuying. 1988. The relationship between pyrope and diamond in kimberlites Liaoning [J]. Acta Mineralogica , 8 (1) : 31~36 (in Chinese).
- Zheng Jianping and Lu Fengxiang. 1994. The Research of the fluid inclusions in diamond [J]. Chinese Science Bulletin , 39 (3) : 253~256 (in Chinese).
- Zhuang Dehou. 1979. Exploring of the kimberlite formation era [J]. Geological Review , 25 (1) : 17~26 (in Chinese).

附中文参考文献

- 董振信. 1981. 我国金伯利岩及其它岩类镁铝榴石 [J]. 地质学报 , 4 : 219~229.
- 董振信. 1991. 我国金伯利岩型金刚石矿床的若干地质特征及其找矿标志 [J]. 矿床地质 , 10 (3) : 255~264.
- 董振信. 1994. 中国金伯利岩 [M]. 北京 : 科学出版社 , 22~276.
- 董振信 , 丛安东 , 韩柱国. 1993. 金伯利岩含金刚石性的矿物学标志 [J]. 矿床地质 , 12 (1) : 47~54.
- 郭立鹤. 1986. 现代矿物学地球化学实验技术与地质应用 [M]. 北京 : 地质出版社 , 1~19.
- 贺灌之. 1980. 金伯利和金刚石的形成机制 [J]. 地质评论 , 26 (5) : 25~28.
- 李树堂. 1993. X射线衍射实验方法 [M]. 北京 : 冶金工业出版社 , 50~128.
- 廖立兵 , 李国武. 2007. X射线衍射方法与应用 [M]. 北京 : 地质出版社 , 63~81.
- 刘粤惠 , 刘平安. 2003. X射线衍射分析原理与应用 [M]. 北京 : 化学工业出版社 , 72~77.
- 路凤香. 1996. 深部地幔及深部流体 [J]. 地质前缘 , 3 (4) : 181~186.
- 潘兆麟. 1985. 结晶学与矿物学 [M]. 北京 : 地质出版社 , 257~258.
- 王璞 , 潘兆麟 , 翁玲宝. 1982. 系统矿物学 (上册 I) [M]. 北京 : 地质出版社 , 160~188.
- 曾毅 , 吴伟 , 高建华. 2009. 扫描电镜和电子探针的基础及应用 [M]. 上海 : 上海科学技术出版社 , 50~96.
- 张安棣 , 谢锡林 , 郭立鹤. 1991. 金刚石找矿指示矿物研究及数据库 [M]. 北京 : 北京科学技术出版社 , 66~89.
- 张鸿翔 , 徐志方 , 黄智龙 , 等. 2000. 地幔流体基本特征及成因 [J]. 地质地球化学 , 28 (2) : 127.
- 张铭杰 , 王先彬 , 刘刚 , 等. 1999. 中国东部新生代碱性玄武岩及幔源捕虏体中的流体组成 [J]. 地质学报 , 73 (2) : 162.
- 张培元 , 齐玉兴 , 胡鸿锴. 1980. 辽宁含金刚石金伯利岩形成的地质条件 [J]. 地质评论 , 26 (1) : 21~27.
- 赵秀英. 1988. 辽宁金伯利岩中镁铝榴石与金刚石的关系 [J]. 矿物学报 , 8 (1) : 31~36.
- 郑建平 , 路凤香. 1994. 金刚石中的流体包裹体研究 [J]. 科学通报 , 39 (3) : 253~256.
- 庄德厚. 1979. 探讨我国金伯利岩形成的时代 [J]. 地质评论 , 25 (1) : 17~26.