

山东蒙阴县西峪矿区深部与外围金刚石指示矿物 ——利用金刚石指示矿物预测金伯利岩的含矿性

赵秀芳

ZHAO Xiufang

山东省第七地质矿产勘查院, 山东 临沂 276006

The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province, Linyi 276000, Shandong, China

摘要:金伯利岩中的石榴子石、铬铁矿和铬透辉石是寻找金刚石矿的重要指示矿物,根据这些指示矿物的含量可大致推断金刚石原生矿的存在及含矿性。石榴子石中G10组指示金伯利岩中金刚石的存在,其含量越高,岩体中金刚石品位相对较富。由西峪G10组含量小于常马G10组含量,可推断西峪金刚石品位小于常马金刚石品位,事实证明推断正确;S1、S2、S6组铬铁矿是与金刚石共生的铬铁矿,西峪矿区62粒S6组和1粒S7组铬铁矿与深源捕虏体橄榄岩有关,几乎全部来自金伯利岩,具有重要指示意义; $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 1.2\%$ 的铬透辉石含量越多,金刚石品位越高。通过统计分析,地表铬透辉石中 $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 1.2\%$ 含量略大于岩管深部,西峪矿区深部矿体平均品位略低于地表矿体平均品位,说明可通过铬透辉石定性地推断金伯利岩的含矿性。结合CSAMT和钻探等地质工作,在西峪岩管群深部-205m以下找到金刚石原生矿,在外围通过槽探工程发现红旗15-1岩脉,并在选矿样中选获18颗金刚石,充分证明了根据金刚石指示矿物找矿方法定性预测金伯利岩含矿性的有效性和可行性。

关键词:金刚石;指示矿物特征;山东西峪矿区

中图分类号:P619.24⁺1

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2019)01-0121-11

Zhao X F. A study of diamond indicative minerals in the depth and periphery of Xiyu, Mengyin County, Shandong Province: Metallogenic properties of kimberlite predicted by diamond indicating minerals. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(1):121-131

Abstract: The garnet, chromite and chromic diopside in kimberlite are important indicative minerals in search for diamond deposits. According to the content of the indicative minerals, the existence and ore-bearing potential of the primary diamond deposits in kimberlite can be roughly deduced. Group G10 in garnet shows the existence of diamond in kimberlite. The higher the content is, the higher the diamond grade in the rock mass is. From $G10_{\text{Xiyu}}\% < G10_{\text{Changma}}\%$, we can infer $C_{\text{Xiyu}} < C_{\text{Changma}}$, and the fact proves that it is true; chromite of Group S1, S2 and S6 are associated with diamond, and chromite of Group S6 with 62 and Group S7 with 1 in Xiyu mining area is related to deep source xenoliths peridotite, which is almost from kimberlite, and has important indication significance; The more the content of chromic diopside with $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 1.2\%$ is, the higher the diamond grade is. By statistical analysis, the content of $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 1.2\%$ in surface chrome-diophanite is slightly greater than that of deep rock pipe, and the average grade of the deep orebody in Xiyu mining area is slightly lower than that in the surface orebody, which shows that the ore-bearing potential of kimberlite can be qualitatively deduced by chromic diopside. In combination with the geological work of CSAMT and drilling, the primary diamond deposits were found below -205m in the deep of the Xiyu rock pipe group, the Red Flag 15-1 rock veins were found in the periphery through the channel exploration projects, and 18 diamonds were obtained in the selection of ore samples. This proves the effectiveness and feasibility of qualitatively predicting the metallogenic properties of kimberlite with the method of indicative minerals of diamond.

Key words: diamond; indicative mineral characteristics; Xiyu mining area, Shandong Province

收稿日期:2018-06-15;修订日期:2018-08-28

资助项目:山东省国土资源厅项目《山东省蒙阴县西峪地区金刚石原生矿深部及外围普查》(编号:鲁国土资发[2015]310号)和中国地质调查局项目《华北与扬子地区金刚石矿产调查》(编号:DD20160059)

作者简介:赵秀芳(1972-),女,硕士,高级工程师,从事地质矿产勘查工作。E-mail:zhxfwg@163.com

石榴子石、铬铁矿、铬透辉石是金伯利岩及其深源包体中极其重要的矿物,不仅可以提供较多的成因信息,而且是寻找金伯利岩的主要标志型矿物^[1-3]。在金刚石原生矿找矿中,根据指示矿物的种类与含量判断含矿原生源的存在及含矿性,目前仍是最价廉、快速、有效的方法。2013—2017年,山东省第七地质矿产勘查院在山东省蒙阴县西峪矿区岩管群深部进行了勘查工作,并在探槽和钻孔岩心中对不同含矿程度金伯利岩中的石榴子石、铬铁矿、铬透辉石进行了系统采样。2014年、2016年中华微束分析技术平台(北京)共享协助分析测试中心、中国冶金地质总局山东局测试中心采用日本岛津公司生产的EPMA-1600型电子探针仪器,利用高能电子束轰击样品,进行电子探针测试,其质量满足《电子探针定量分析方法通则》(GB/T 15074—94)的要求。

1 指示矿物特征

1.1 石榴子石

石榴子石是金伯利岩中最重要的指示矿物之一,其氧化物含量及颜色、折光率等物理光学性质可作为石榴子石的标型特征^[4]。Dawson等^[5]根据石榴子石的主要化学成分 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 CaO 的含量将石榴子石分成12组。Gurney等^[6]对G10石榴子石的指认简化了一些变量,对 CaO 、 Cr_2O_3 含量界线作了调整,提高了具“指示”矿物意义的石榴子石比例,总结出了 $\text{CaO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$ 图解(图1)。目前国内多采用该分类标准。

石榴子石主要分为橄榄岩型和榴辉岩型2类,所有榴辉岩型分布于 $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 2\%$ 的区域,橄榄岩

型石榴子石分布于 $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 2\%$ 的区域。在橄榄岩型石榴子石区域, $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 4\%$ 的部分又由85%的斜线(贫钙线)分为两部分,其左侧部分为金刚石包体石榴子石(G10,含金刚石方辉橄榄岩石榴子石),G10石榴子石覆盖了85%的橄榄岩型金刚石包体石榴子石的总体分布,从而确定了它的指示矿物地位;右侧部分为二辉橄榄岩石榴子石(G9),占橄榄岩型石榴子石总数的15%。据格尼统计结果表明多数含金刚石金伯利岩含有G10石榴子石,且G10石榴子石总量越高,岩体金刚石品位越富。由Gurney图可以大致认为,含钙较低、含铬较高的石榴子石与金刚石含量较高有关。

西峪岩管群深部石榴子石取得样品34粒(表1),经电子探针测试,其中 $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 2\%$ 的石榴子石15粒; $2\% < \text{Cr}_2\text{O}_3 < 4\%$ 的石榴子石2粒, $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 4\%$ 的17粒,G10组石榴子石6粒,G9组石榴子石11粒,G10组占35.29%,其成分图解见图2。G10组石榴子石主要产于含金刚石金伯利岩粗晶石榴子石中,可指示金伯利岩中金刚石的存在。据Gurney统计,G10石榴子石在岩体中的含量与该岩体中金刚石的含量有半定量关系,即G10组石榴子石含量高,岩体中金刚石品位C较富。2011—2015年,常马矿区胜利1号岩管深部石榴子石样品测试17粒,其中G10组10粒,G9组7粒,G10组占58.82%,C平均 $378.505\text{mg}/\text{m}^3$ 。对比常马胜利1号岩管,G10_{西峪}% $<$ G10_{常马}%,从而推断C_{西峪} $<$ C_{常马}。事实证明,在西峪岩管深部-205~-355m标高范围内选矿样品中选获的金刚石样品C平均为 $110.03\text{mg}/\text{m}^3$,低于C_{常马} $378.505\text{mg}/\text{m}^3$,证实G10石榴子石在岩体中的含量与该岩体金刚石含量存在半定量关系。

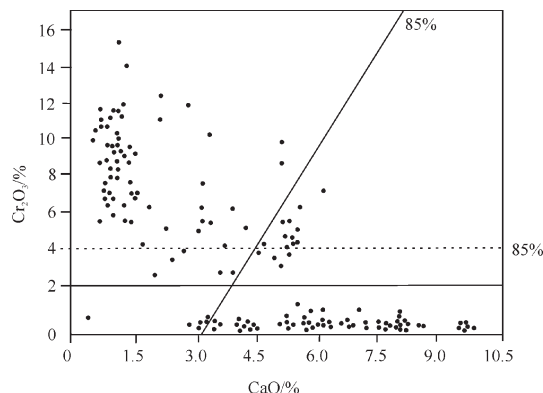


图1 石榴子石 Gurney图

Fig. 1 Gurney diagram of the garnet

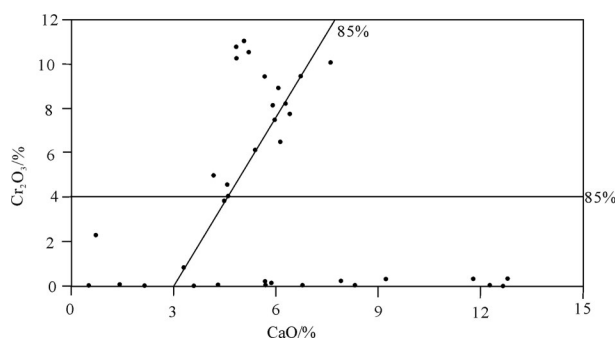


图2 西峪矿区金伯利岩石榴子石 Gurney图

Fig. 2 Gurney diagram of the garnet of kimberlite in the Xiyu mining area

表 1 石榴子石电子探针测试分析及分组

Table 1 Garnet's electron microprobe analyses and grouping table

序号	样号	工程编号	样品名称	氧化物含量/%					分组	备注
				Cr ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO		
1	ZZ1-1	XK1	镁铝榴石	0.30	9.09	0.19	20.03	7.87		岩管群深部
2	ZZ1-2	XK1	镁铝榴石	0.05	3.49	0.00	21.90	3.59		岩管群深部
3	ZZ1-3	XK1	镁铝榴石	0.81	1.73	0.42	18.76	3.32		岩管群深部
4	ZZ1-4	XK1	镁铝榴石	0.15	1.08	0.00	21.24	5.83		岩管群深部
5	ZZ1-5	XK1	镁铝榴石	0.26	7.22	0.14	17.68	9.23		岩管群深部
6	ZZ1-6	XK1	镁铝榴石	0.22	1.84	0.00	21.18	5.68		岩管群深部
7	ZZ1-7	XK1	镁铝榴石	0.14	1.23	0.07	21.16	5.86		岩管群深部
8	ZZ1-8	XK1	镁铝榴石	0.08	0.53	0.03	21.31	4.28		岩管群深部
9	ZZ1-9	XK1	镁铝榴石	0.34	8.02	0.07	19.47	12.79		岩管群深部
10	ZZ1-10	XK1	镁铝榴石	0.12	2.41	0.00	18.13	5.88		岩管群深部
11	ZZ1-11	XK1	镁铝榴石	0.07	3.83	0.00	23.03	1.42		岩管群深部
12	ZZ1-12	XK1	镁铝榴石	0.36	6.96	0.09	20.96	11.79		岩管群深部
13	ZZ2-1	XK1	镁铝榴石	6.44	20.20	0.60	17.97	6.12	G9	岩管群深部
14	ZZ2-2	XK1	镁铝榴石	8.93	19.30	0.11	14.63	6.08	G9	岩管群深部
15	ZZ2-3	XK1	镁铝榴石	10.23	20.40	0.09	15.25	4.85	G10	岩管群深部
16	ZZ2-4	XK1	镁铝榴石	10.06	18.40	0.48	15.26	7.62	G9	岩管群深部
17	ZZ2-5	XK1	镁铝榴石	10.49	20.20	0.04	16.08	5.22	G10	岩管群深部
18	ZZ2-8	XK1	镁铝榴石	7.71	19.80	0.21	16.88	6.41	G9	岩管群深部
19	ZZ2-9	XK1	镁铝榴石	8.19	19.40	0.41	16.95	6.28	G9	岩管群深部
20	ZZ2-10	XK1	镁铝榴石	9.39	18.70	0.02	16.60	6.75	G9	岩管群深部
21	ZZ2-11	XK1	镁铝榴石	6.10	20.40	0.51	18.49	5.41	G9	岩管群深部
22	ZZ2-12	XK1	镁铝榴石	9.40	19.20	0.12	17.34	5.67	G9	岩管群深部
23	ZZ2-13	XK1	镁铝榴石	2.27	21.00	0.03	19.24	0.72		岩管群深部
24	XK3ML02-1	XK3	锰铝榴石	0.02	0.61	0.40	17.92	2.18		岩管群深部
25	XK4ML01-1	XK4	铁铝榴石	0.01	3.01	/	20.57	5.68		岩管群深部
26	XK4ML01-2	XK4	镁铝榴石	3.86	21.61	0.26	19.75	4.51		岩管群深部
27	XK4ML01-3	XK4	镁铝榴石	4.06	22.69	0.41	19.52	4.61	G10	岩管群深部
28	XK5ML01-2	XK5	镁铝榴石	10.98	20.88	0.42	15.32	5.08	G9	岩管群深部
29	XK5ML01-3	XK5	镁铝榴石	4.50	21.46	0.38	19.33	4.59	G10	岩管群深部
30	XK6ML01-1	XK6	镁铝榴石	8.10	19.80	0.16	17.00	5.94	G9	岩管群深部
31	XK6ML01-2	XK6	铁铝榴石	0.02	3.19	0.02	20.36	6.79		岩管群深部
32	XK6ML01-3	XK6	镁铝榴石	4.98	22.66	0.10	19.71	4.20	G10	岩管群深部
33	XK7ML01-1	XK7	镁铝榴石	10.75	21.19	0.24	14.45	4.84	G10	岩管群深部
34	XK7ML01-2	XK7	镁铝榴石	7.48	20.80	0.12	16.91	5.97	G9	岩管群深部
35	RZ-1-1	RZ-1	锰铝榴石	0.00	0.75	0.06	19.48	0.53		红旗 15-1 号
36	RZ-1-2	RZ-1	铁铝榴石	0.02	3.00	0.05	20.75	12.66		红旗
37	RZ-3-1	RZ-3	含纳镁-铁铝榴石	0.02	4.98	0.78	20.27	8.30		15-1 号
38	RZ-3-3	RZ-3	铁铝榴石	0.00	1.29	0.10	20.27	12.25		红旗

红旗15-1号岩脉中选出的4粒石榴子石,其中2粒为铁铝榴石,1粒为含钠镁-铁铝榴石,1粒为锰铝榴石。3粒铁铝榴石 Cr_2O_3 含量皆小于2%,为榴辉岩型石榴子石。经电子探针分析,含1粒钠镁-铁铝榴石,其主要化学成分为 Na_2O 0.07%、 Cr_2O_3 0.02%、 TiO_2 0.78%、 MgO 4.98%,据《山东金伯利岩的矿物学特征》^[7]和《金刚石找矿指示矿物研究及数据库》^[8]可知,为含金刚石金伯利岩。

1.2 铬铁矿

高铬铬铁矿类矿物是金伯利岩及其深源包体中极其重要的一类矿物,不仅可以提供较多的成因信息,而且是评价金伯利岩含金刚石性的一级指示矿物,也是金刚石中较常见的包裹体矿物。张安棣等^[8]根据铬铁矿的主要化学成分(Cr_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 含量),将铬铁矿划分为12组(表2)。

本次在西峪岩管群深部选矿样中随机挑选85粒铬铁矿进行电子探针分析,其化学成分及分组见表2。其中S1组4粒、S2组11粒、S4组7粒、S5组1粒、S6组61粒、S7组1粒。

对照表2,根据本次测试成果表3,S1组代表了金刚石最早期铬铁矿包体的化学成分特征,反映了其形成时的高亏损条件及与金刚石形成时基本相同的上地幔温度、压力等物理化学条件。S2组代表了金刚石中较晚期的铬铁矿包体及与金刚石连生

的铬铁矿的成分特征。S1组和S2组的铬铁矿都是与金刚石共生的铬铁矿,它们对金刚石的存在具有较好的指示意义。S4组、S5组4粒铬铁矿为非金伯利岩成因铬铁矿。S6组铬铁矿几乎全部来自金伯利岩和钾镁煌斑岩,因此具有岩石属性的重要指示意义。金伯利岩基质铬铁矿、深源捕虏体橄榄岩中的铬铁矿也大多属于这一组,样品中S6组占71.76%。

红旗15-1号RZ-2中选出3粒铬铁矿(表3),经电子探针判别S5组2粒、S6组1粒,S6组铬铁矿指示其来自金伯利岩。

在铬铁矿主量元素研究中, Cr_2O_3 、 Al_2O_3 和 TiO_2 具有重要的意义, MgO 、 Fe_2O_3 及 MnO 具有一定的指示意义。

(1) Cr_2O_3 和 Al_2O_3

铬铁矿中 Cr_2O_3 和 Al_2O_3 的含量变化范围很大。 Cr_2O_3 含量可以从百分之几至67%, Al_2O_3 含量从小于1%到50%以上。中国含金刚石的金伯利岩(胜利1号、辽宁42号)中多数铬铁矿 Cr_2O_3 含量大于55%, Al_2O_3 含量小于10%,而不含矿金伯利岩(河南洪峪、河北涉县6号)的铬铁矿中 Cr_2O_3 含量偏低, Al_2O_3 含量偏高^[8]。由图3可知,西峪岩管群深部铬铁矿符合含金刚石金伯利岩中铬铁矿化学元素特征,红旗15-1号中铬铁矿数量较少,不能很好地反映金伯利岩的含矿性。金刚石中的铬铁

表2 铬铁矿分组
Table 2 Chromite's grouping table

分组	化学成分特征	$\text{Cr}_2\text{O}_3/\%$	$\text{MgO}/\%$	$\text{TiO}_2/\%$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	产出岩石
S1	无-贫钛贫铝富镁	64.00	12.72	0.12	5.29	金刚石包体、含矿金伯利岩、含矿钾镁煌斑岩
S2	含钛贫铝富镁	64.63	11.07	0.42	4.29	
S3	高镁高铬	67.37	15.43	0.36	6.54	金刚石包体、含矿金伯利岩及少数陨石
S4	贫钛富镁富铝	52.81	11.69	0.48	12.17	$\text{TiO}_2 > 0.5\%$ 为金伯利岩 $\text{TiO}_2 > 1.1\%$ 为钾镁煌斑岩, $\text{TiO}_2 < 0.5\%$ 为非金伯利岩
S5	贫钛富镁高铝	47.21	13.04	0.43	21.67	和非钾镁煌斑岩
S6	富钛贫铝镁	57.52	10.89	3.14	3.87	金伯利岩、钾镁煌斑岩
S7	高钛富铝镁	48.43	10.32	4.08	10.25	钾镁煌斑岩、二型金伯利岩
S8	贫铝富铁	54.51	5.91	0.28	3.35	二辉橄榄岩、金伯利岩
S9	低钛贫镁	60.71	3.56	0.68	6.17	陨石、铬铁矿床
S10	低钛富镁高铝	35.38	14.40	0.13	34.14	煌斑岩、不含金刚石的钾镁煌斑岩及金伯利岩
S11	含铬镁铝	14.35	18.56	0.06	52.50	玄武岩
S12	高钛富铁	41.77	0.72	9.15	6.49	陨石

表 3 西峪岩管群与红旗 15-1 号岩脉铬铁矿电子探针分析及分组

Table 3 Electron microprobe analyses and grouping table of Xiyu rock groups and Red Flag 15-1 vein

顺序号	样号	工程编号	样品名称	Cr ₂ O ₃ %	MgO%	TiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ %	分组	备注
1	ZZ5-2	XK1	铬铁矿	67.02	5.41	0.8	0.79	S2	岩管群深部
2	ZZ5-3	XK1	铬铁矿	55.49	11.55	0.13	10.22	S4	岩管群深部
3	ZZ5-4	XK1	铬铁矿	61.9	12.14	0.73	1.93	S2	岩管群深部
4	ZZ5-5	XK1	铬铁矿	57.01	8.93	3.16	1.1	S6	岩管群深部
5	ZZ5-6	XK1	铬铁矿	59.4	10.62	0.09	5.72	S6	岩管群深部
6	ZZ5-7	XK1	铬铁矿	63.26	7.23	0.21	4.71	S2	岩管群深部
7	ZZ5-8	XK1	铬铁矿	55.4	6.16	2.82	0.8	S6	岩管群深部
8	ZZ5-10	XK1	铬铁矿	54.12	4.69	2.62	0.83	S6	岩管群深部
9	ZZ5-12	XK1	铬铁矿	56.3	13.19	0.21	12.04	S4	岩管群深部
10	ZZ5-13	XK1	铬铁矿	54.6	8.91	2.67	1.03	S6	岩管群深部
11	ZZ5-14	XK1	铬铁矿	54.89	7.34	2.84	0.97	S6	岩管群深部
12	ZZ5-15	XK1	铬铁矿	50.79	12.51	3.86	5.61	S6	岩管群深部
13	ZZ5-16	XK1	铬铁矿	54.84	5.09	3.16	1.23	S6	岩管群深部
14	ZZ5-17	XK1	铬铁矿	54.78	11.18	2.84	0.97	S6	岩管群深部
15	ZZ5-18	XK1	铬铁矿	59.43	3.32	2.93	0.49	S6	岩管群深部
16	ZZ5-19	XK1	铬铁矿	55.36	6.24	2.46	3.72	S6	岩管群深部
17	ZZ5-20	XK1	铬铁矿	54.54	7.88	2.4	3.86	S6	岩管群深部
18	ZZ5-22	XK1	铬铁矿	55.32	7.53	1.17	4.42	S6	岩管群深部
19	ZZ5-24	XK1	铬铁矿	55.87	7.93	1.29	4.18	S6	岩管群深部
20	ZZ5-25	XK1	铬铁矿	56.69	8.87	2.9	5.14	S6	岩管群深部
21	ZZ5-26	XK1	铬铁矿	57.45	8.42	3.13	0.55	S6	岩管群深部
22	ZZ5-27	XK1	铬铁矿	57.57	6.94	3	0.53	S6	岩管群深部
23	ZZ5-29	XK1	铬铁矿	59.44	8.12	2.25	0.53	S6	岩管群深部
24	ZZ5-30	XK1	铬铁矿	58.43	1.96	2.85	0.58	S6	岩管群深部
25	ZZ5-31	XK1	铬铁矿	54.29	11.74	2.95	5.32	S6	岩管群深部
26	ZZ5-32	XK1	铬铁矿	55.87	8.71	0.28	9.7	S6	岩管群深部
27	ZZ6-1	XK2	铬铁矿	55.2	9.2	2.83	1.25	S6	岩管群深部
28	ZZ6-2	XK2	铬铁矿	57.63	9.5	1.61	3.11	S6	岩管群深部
29	ZZ6-3	XK2	铬铁矿	62.52	2.94	2.91	0.4	S6	岩管群深部
30	ZZ6-4	XK2	铬铁矿	56.13	9.62	2.88	0.94	S6	岩管群深部
31	ZZ6-5	XK2	铬铁矿	58.67	7.43	2.88	0.98	S6	岩管群深部
32	ZZ6-6	XK2	铬铁矿	60.19	4.92	3.17	0.5	S6	岩管群深部
33	ZZ6-8	XK2	铬铁矿	59.99	5.67	2.95	0.82	S6	岩管群深部
34	ZZ6-9	XK2	铬铁矿	55.49	7.76	2.99	1.2	S6	岩管群深部
35	ZZ6-10	XK2	铬铁矿	54.64	10.82	2.37	3.01	S6	岩管群深部
36	ZZ6-11	XK2	铬铁矿	56.05	8.6	5.21	3.04	S6	岩管群深部
37	ZZ6-12	XK2	铬铁矿	56.85	8.45	0.76	3.01	S6	岩管群深部
38	ZZ6-13	XK2	铬铁矿	56.23	8.79	1.09	2.98	S6	岩管群深部
39	ZZ6-14	XK2	铬铁矿	60.03	6.86	2.33	2.51	S6	岩管群深部
40	ZZ6-15	XK2	铬铁矿	54.45	11.38	1.51	3.03	S6	岩管群深部
41	ZZ6-16	XK2	铬铁矿	57.04	9.24	6.47	0.33	S4	岩管群深部
42	ZZ6-17	XK2	铬铁矿	56.89	10.21	1.44	2.87	S6	岩管群深部
43	ZZ6-18	XK2	铬铁矿	56.61	5.64	0.75	3.02	S6	岩管群深部
44	ZZ6-19	XK2	铬铁矿	56.5	8.46	2.49	2.96	S6	岩管群深部
45	ZZ6-20	XK2	铬铁矿	49.54	9.65	7.32	4.54	S6	岩管群深部
46	ZZ6-21	XK2	铬铁矿	56.21	9.67	0.84	2.9	S6	岩管群深部
47	ZZ6-22	XK2	铬铁矿	54.51	10.57	1.46	2.93	S6	岩管群深部
48	ZZ6-24	XK2	铬铁矿	64.49	5.79	4.63	0.32	S2	岩管群深部

续表 3

顺序号	样号	工程编号	样品名称	Cr ₂ O ₃ /%	MgO/%	TiO ₂ /%%	Al ₂ O ₃ /%	分组	备注
49	ZZ6-25	XK2	铬铁矿	50.54	12.55	6.29	1.52	S4	岩管群深部
50	ZZ6-26	XK2	铬铁矿	55.27	9.35	6.19	0.98	S4	岩管群深部
51	ZZ6-27	XK2	铬铁矿	54.38	10.37	1.19	2.99	S6	岩管群深部
52	ZZ6-28	XK2	铬铁矿	53.74	8.7	1.44	2.77	S6	岩管群深部
53	ZZ6-29	XK2	铬铁矿	59.41	5.76	0.6	2.93	S6	岩管群深部
54	ZZ6-30	XK2	铬铁矿	60.19	7.35	0.76	3.06	S6	岩管群深部
55	ZZ6-31	XK2	铬铁矿	59.67	12.43	4.05	2.6	S6	岩管群深部
56	ZZ6-32	XK2	铬铁矿	49.97	15.65	8.86	3.48	S7	岩管群深部
57	XK3GT01-1	XK3	铬铁矿	56.35	8.16	3.32	0.78	S6	岩管群深部
58	XK3GT01-3	XK3	铬铁矿	58.68	9.4	3.08	2.01	S4	岩管群深部
59	XK3GT01-4	XK3	铬铁矿	60.02	9.25	0.04	6.54	S6	岩管群深部
60	XK3GT01-5	XK3	铬铁矿	62.07	9.09	0.15	2.93	S2	岩管群深部
61	XK4GT01-1	XK4	铬铁矿	62.25	10.9	1.78	2.59	S2	岩管群深部
62	XK4GT01-2	XK4	铬铁矿	60.95	9.03	0.13	3.36	S6	岩管群深部
63	XK4GT01-3	XK4	铬铁矿	59.55	9.47	3.06	1.55	S6	岩管群深部
64	XK5GT01-1	XK5	铬铁矿	64.17	10.07	0.14	4.51	S2	岩管群深部
65	XK5GT01-2	XK5	铬铁矿	57.9	8.77	3.32	1.32	S6	岩管群深部
66	XK5GT01-3	XK5	铬铁矿	56.24	6.56	3.32	0.92	S6	岩管群深部
67	XK5GT01-4	XK5	铬铁矿	65.53	11.37	0.07	3.96	S1	岩管群深部
68	XK5GT01-5	XK5	铬铁矿	62.08	10.56	0.46	4.05	S2	岩管群深部
69	XK5GT01-6	XK5	铬铁矿	58.15	8.63	3.06	1	S6	岩管群深部
70	XK6GT01-1	XK6	铬铁矿	62.73	9.97	0.26	3.6	S2	岩管群深部
71	XK6GT01-2	XK6	铬铁矿	65.33	11.99	0.14	4.65	S1	岩管群深部
72	XK6GT01-3	XK6	铬铁矿	62.33	9.35	0.26	3.47	S2	岩管群深部
73	XK6GT01-4	XK6	铬铁矿	60.42	11.68	0.14	6.37	S6	岩管群深部
74	XK6GT01-5	XK6	铬铁矿	56.43	10.61	2.66	3.79	S6	岩管群深部
75	XK6GT02-1	XK6	铬铁矿	64.46	10.4	0.44	3.24	S2	岩管群深部
76	XK6GT02-2	XK6	铬铁矿	63.17	11.66	1.17	2.96	S2	岩管群深部
77	XK6GT02-3	XK6	铬铁矿	56.86	8.37	3.07	0.88	S6	岩管群深部
78	XK6GT02-4	XK6	铬铁矿	57	8.19	2.72	0.88	S6	岩管群深部
79	XK6GT02-5	XK6	铬铁矿	56.42	8.02	3.41	0.76	S6	岩管群深部
80	XK7GT01-1	XK7	铬铁矿	59.3	11.19	1.45	4.71	S6	岩管群深部
81	XK7GT01-2	XK7	铬铁矿	59.01	11.23	1.3	4.69	S6	岩管群深部
82	XK7GT01-3	XK7	铬铁矿	62.52	10.97	0.14	4.53	S1	岩管群深部
83	XK7GT01-4	XK7	铬铁矿	46	13.03	0.36	20.64	S5	岩管群深部
84	XK7GT01-5	XK7	铬铁矿	56.88	11.04	0.92	6.3	S4	岩管群深部
85	XK7GT01-6	XK7	铬铁矿	62.45	9.6	0.2	4.28	S1	岩管群深部
86	RZ-2-1	RZ-2	铬铁矿	57.04	6.48	2.61	4.87	S6	矿区外围
87	RZ-2-2	RZ-2	铬铁矿	42.74	12.57	0.05	25.39	S5	矿区外围
88	RZ-2-3	RZ-2	铬铁矿	43.29	11.37	0.07	25.06	S5	矿区外围

矿包体是最富 Cr₂O₃ 的端元, Cr₂O₃ 含量一般高于 62%, Al₂O₃ 含量较低, 平均约为 5%。利用铬铁矿中的 Cr₂O₃、Al₂O₃ 含量及其比值可定性地判别岩性和含矿性。铬铁矿中的 Cr/Al 值代表地幔亏损和富集程度, 比值越高, 亏损越大, 金刚石中的铬铁矿包体具有极高的亏损。

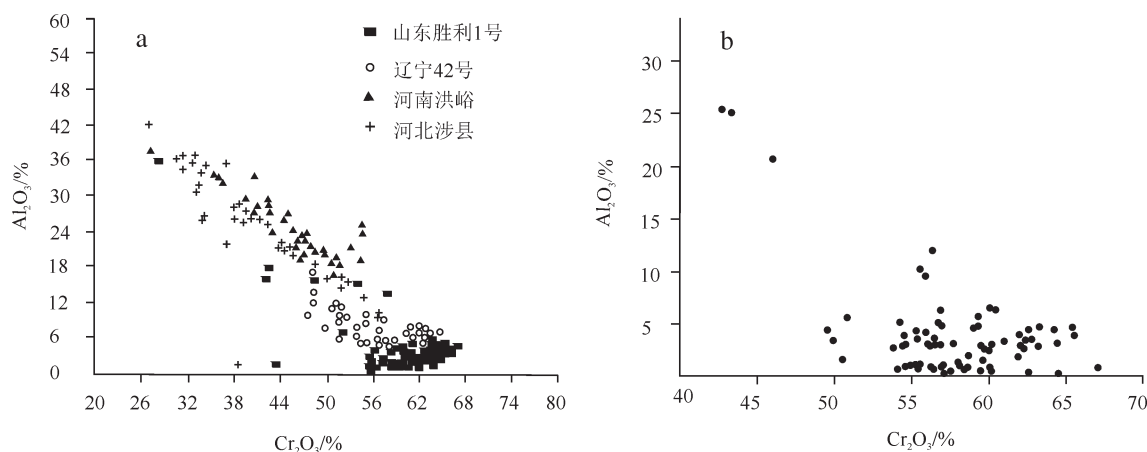
(2) Cr₂O₃ 和 TiO₂

铬铁矿中 TiO₂ 的绝对含量不高, 但变化范围具有典型的特征, 含金伯利岩中铬铁矿 TiO₂ 含量区

间宽, 一般为 0~6%, 非金伯利岩铬铁矿 TiO₂ 含量区间窄, 一般为 0~2%。本次铬铁矿中 TiO₂ 含量在 0.04%~8.86% 之间(图 4), 符合含金伯利岩铬铁矿特征。散点域呈“一”字形, 成分谱线宽, 成分密集点分布在高 Cr₂O₃、富 TiO₂ 处, 即 Cr₂O₃ 含量 50%~60%、TiO₂ 含量 2%~4% 处, 是因为金伯利岩中 S6 组 TiO₂ 平均含量为 2.30% 的铬铁矿占据多数。

(3) MgO 和 FeO

Mg⁺ 和 Fe⁺ 占铬尖晶石二价阳离子的 98% 以上,

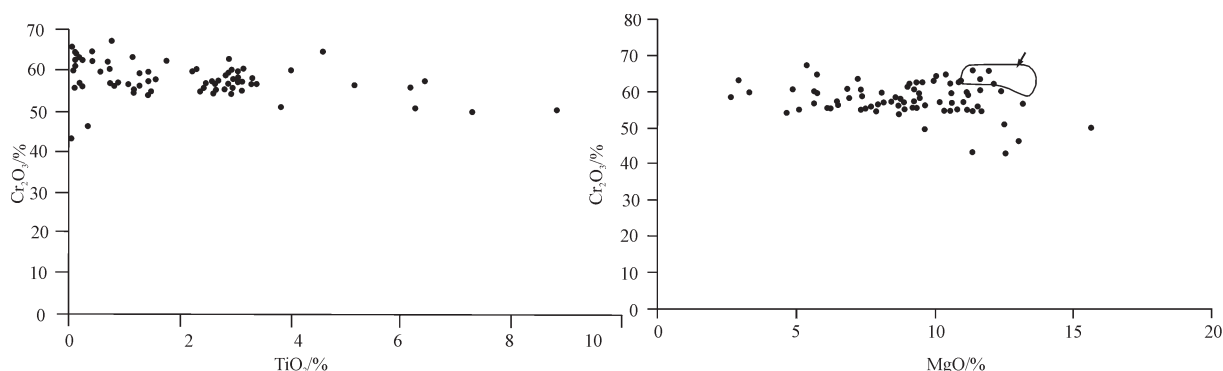
图3 各地区铬铁矿(a)与西峪地区铬铁矿(b)Cr₂O₃-Al₂O₃对比图Fig. 3 Cr₂O₃-Al₂O₃ comparison diagrams of chromite in each region (a) and Xiyu area(b)

彼此呈严格的消长关系。中国金伯利岩中的铬尖晶石大部分为富镁铬铁矿, $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 值通常为 0.45~0.70, 即 MgO 含量一般为 10%~15%, 变化范围小, FeO 则在 15%~20% 范围内变化。本次测试的西峪岩管群深部铬尖晶石中 MgO 含量一般为 1.96%~15.65%, 略偏低; FeO 含量一般为 20%~30%, 略增高。铬铁矿中有 5 粒(图 4)落在金刚石包裹体(化学成分特征是高 Cr₂O₃、中-高 MgO、TiO₂<6%)区, 为含金刚石方辉橄榄岩所特有。红旗 15-1 号岩脉由于采样体积所限, 目前获得的铬铁矿数量较少, 分布特征不明显, 但 3 颗铬铁矿均落在含矿金伯利岩的铬铁矿范围。

1.3 铬透辉石

铬透辉石属橄榄岩型组合, 在地表环境中, 铬透辉石很不稳定, 搬运过程中容易磨损乃至消失,

难以形成较大范围的次生分散晕。作为寻找金刚石原生矿的指示矿物, 在区域找矿上不及镁铝榴石、铬铁矿等重要, 但铬透辉石一经发现, 就表明离其供源地不远, 同时铬透辉石中的 Cr₂O₃ 含量也可指示金伯利岩的含矿性: 金伯利岩中 Cr₂O₃≥1.2% 的铬透辉石含量越多, 金刚石品位越高。据任喜荣等^①统计, 西峪岩管群红旗 6 号、8 号、22 号浅部 19 粒透辉石的化学成分, Cr₂O₃≥1.2% 的铬透辉石为 8 粒, 占 42.1%。根据选矿结果, 地表至垂深 90m(+245~+155m 标高), 红旗 8 号矿体平均品位为 20.43mg/m³、红旗 6 号为 27.71mg/m³、红旗 22 号为 28.92mg/m³; -85m 标高 7 号、22 号、18 号、6 号、32 号、8 号 6 个岩管相连, 各岩管收拢归并为二向延长的“丁”字形矿带。随着深度增加, 岩管逐渐变细, 至 -805m 标高, 岩管形成 NNE 向为主的单向延伸, 中心位于红旗

图4 铬铁矿 TiO₂-Cr₂O₃与 MgO-Cr₂O₃散点图Fig. 4 TiO₂-Cr₂O₃ and MgO-Cr₂O₃ scatter diagrams of chromite

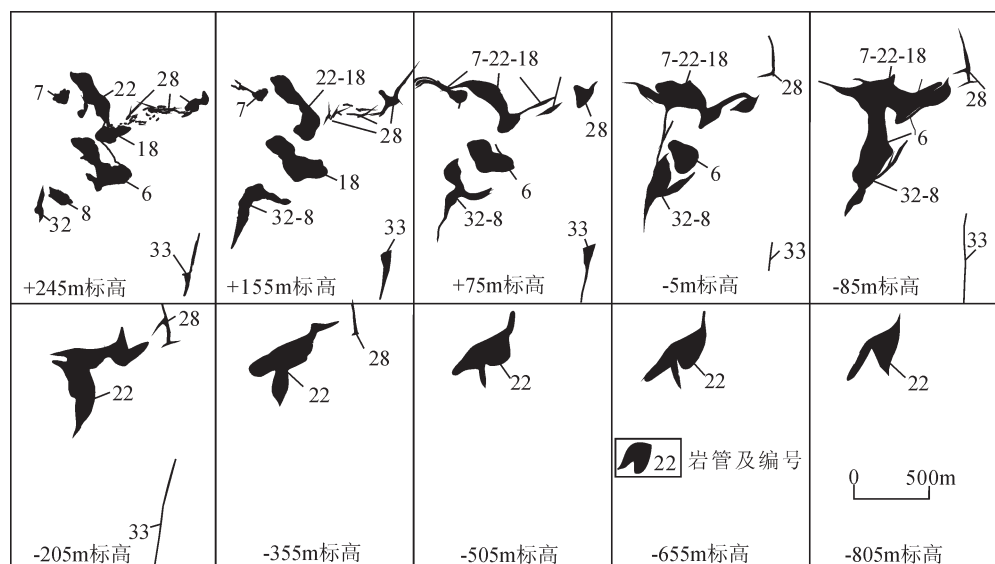


图5 西峪岩管群不同垂深岩管形态平面示意图

Fig. 5 Sketch plan view of rock tube shapes about Xiyu rock group in different vertical depths

22号的正下方(图5)。本次工作电子探针测试了48粒透辉石(表4)。从表4可以看出, $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 1.2\%$ 的铬透辉石为17粒,占37.0%。至-355~-655m标高,矿体平均品位 $23.82\text{mg}/\text{m}^3$,由于地表 $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 1.2\%$ 含量略大于岩管深部,因此深部矿体平均品位略低于地表矿体平均品位。事实证明,利用 $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 1.2\%$ 的铬透辉石含量可定性地指示金伯利岩的含矿性。

如图6所示,西峪岩管群深部金伯利岩中选获的透辉石散点图特征突出。 Cr_2O_3 与 Na_2O 成分点呈正相关方向展布, Cr_2O_3 与 MgO 成分点呈负相关方向展布,成分点密集区在 Cr_2O_3 0.5%~2%之间。

2 选获金刚石的特征

本次在选矿样中共选获18粒金刚石,其中XK2选矿样中选获11粒金刚石,XK3选矿样中选获3粒金刚石,XK5选矿样中选获1粒金刚石,XK6选矿样中选获2粒金刚石,XK7选矿样中选获1粒金刚石。金刚石具体特征如表5所示。

本次选矿样选获的18颗金刚石中,含包裹体的金刚石10颗,占55.56%。颜色:无色透明的金刚石10颗,占55.56%,黄色、浅黄色的占44.44%。晶体形态:八面体与菱形十二面体聚型2颗,立方体与八面

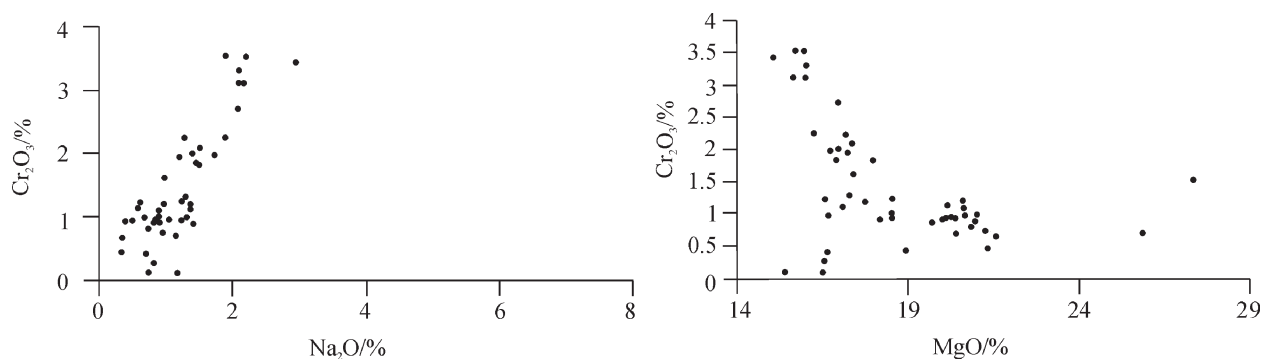


图6 西峪岩管群透辉石成分散点图

Fig. 6 The scatter diagram of diopside composition about Xiyu rock tube group

表 4 西峪矿区透辉石电子探针分析结果

Table 4 Electron microprobe analyses of diophanite in Xiyu mining area

序号	样号	工程编号	样品名称	Cr ₂ O ₃ /%	MgO/%	TiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Na ₂ O/%	备注
1	ZZ2-6	XK3	铬透辉石	1.49	27.40	1.52	6.66	0.07	岩管群深部
2	ZZ2-7	XK3	铬透辉石	0.66	25.90	1.90	6.03	0.00	岩管群深部
3	XK3TH01-1	XK3	铬透辉石	3.06	16.06	0.04	1.60	2.13	岩管群深部
4	XK3TH01-2	XK3	铬透辉石	1.78	18.10	0.26	1.40	1.50	岩管群深部
5	XK3TH01-3	XK3	透辉石	0.37	19.02	0.06	0.88	0.38	岩管群深部
6	XK3TH02-1	XK3	透辉石	0.68	21.30	0.09	1.34	0.99	岩管群深部
7	XK3TH02-2	XK3	透辉石	0.85	21.06	0.11	1.27	0.95	岩管群深部
8	XK3TH02-3	XK3	透辉石	0.89	20.45	0.22	1.64	1.28	岩管群深部
9	XK3TH02-4	XK3	透辉石	0.86	18.25	0.43	0.71	0.87	岩管群深部
10	XK3TH03-1	XK3	透辉石	0.88	20.16	0.31	0.36	0.54	岩管群深部
11	XK3TH03-2	XK3	透辉石	0.64	20.46	0.10	1.64	1.20	岩管群深部
12	XK3TH03-3	XK3	透辉石	0.82	19.81	0.34	1.74	1.45	岩管群深部
13	XK4TH01-1	XK4	透辉石	0.86	20.09	0.27	0.32	0.45	岩管群深部
14	XK4TH01-2	XK4	透辉石	0.41	21.39	1.19	1.17	5.83	岩管群深部
15	XK4TH01-3	XK4	铬透辉石	1.25	17.34	0.30	0.36	1.35	岩管群深部
16	XK4TH02-1	XK4	铬透辉石	3.06	15.71	0.15	1.07	2.20	岩管群深部
17	XK4TH02-2	XK4	铬透辉石	2.20	16.32	0.04	1.64	1.95	岩管群深部
18	XK4TH02-3	XK4	铬透辉石	1.56	17.46	0.00	1.86	1.04	岩管群深部
19	XK4TH02-4	XK4	铬透辉石	2.18	17.27	0.15	0.64	1.33	岩管群深部
20	XK4TH03-1	XK4	透辉石	1.18	16.65	0.32	0.13	1.28	岩管群深部
21	XK4TH03-3	XK4	透辉石	0.35	16.74	0.50	0.32	0.74	岩管群深部
22	XK4TH03-4	XK4	透辉石	0.91	16.73	0.47	0.31	0.89	岩管群深部
23	XK4TH04-1	XK4	透辉石	0.05	15.51	0.47	0.43	1.21	岩管群深部
24	XK4TH04-2	XK4	透辉石	0.05	16.56	0.36	0.23	0.79	岩管群深部
25	XK4TH04-3	XK4	透辉石	0.21	16.65	0.31	0.26	0.87	岩管群深部
26	XK4TH05-1	XK4	铬透辉石	1.77	16.95	0.14	0.95	1.54	岩管群深部
27	XK4TH05-2	XK4	铬透辉石	2.04	17.43	0.00	1.03	1.57	岩管群深部
28	XK5TH01-1	XK5	透辉石	0.95	18.59	0.04	1.06	0.95	岩管群深部
29	XK5TH01-2	XK5	透辉石	0.60	21.65	/	0.72	0.40	岩管群深部
30	XK5TH02-1	XK5	透辉石	1.06	17.16	0.01	1.62	1.41	岩管群深部
31	XK5TH02-2	XK5	透辉石	0.93	21.09	0.13	1.06	0.73	岩管群深部
32	XK5TH02-3	XK5	透辉石	0.89	18.60	/	1.34	1.10	岩管群深部
33	XK5TH03-1	XK5	铬透辉石	3.25	16.08	0.11	0.60	2.14	岩管群深部
34	XK5TH03-2	XK5	铬透辉石	2.67	17.01	0.21	1.46	2.12	岩管群深部
35	XK5TH03-3	XK5	铬透辉石	3.48	16.05	0.02	1.03	2.24	岩管群深部
36	XK5TH03-4	XK5	铬透辉石	3.38	15.14	0.01	2.24	2.99	岩管群深部
37	XK6TH02-1	XK6	铬透辉石	1.92	16.80	0.30	1.52	1.77	岩管群深部
38	XK6TH02-2	XK6	铬透辉石	3.49	15.78	0.14	0.48	1.94	岩管群深部
39	XK6TH02-3	XK6	铬透辉石	1.95	17.03	0.19	0.80	1.43	岩管群深部
40	XK7TH01-1	XK7	透辉石	1.13	17.78	0.31	1.73	1.42	岩管群深部
41	XK7TH01-2	XK7	透辉石	1.15	20.69	0.20	1.07	1.02	岩管群深部
42	XK7TH01-3	XK7	透辉石	0.75	20.91	0.09	1.20	0.79	岩管群深部
43	XK7TH01-4	XK7	透辉石	1.04	20.70	0.10	1.30	0.95	岩管群深部
44	XK7TH01-5	XK7	透辉石	1.16	18.62	/	0.67	0.66	岩管群深部
45	XK7TH01-6	XK7	透辉石	0.90	20.33	0.38	1.09	0.92	岩管群深部
46	XK7TH01-7	XK7	透辉石	0.93	20.75	0.25	1.62	1.35	岩管群深部
47	XK7TH01-8	XK7	铬透辉石	1.90	17.30	0.14	0.64	1.26	岩管群深部
48	XK7TH01-9	XK7	透辉石	1.08	20.23	0.08	0.63	0.63	岩管群深部

表5 金刚石特征
Table 5 Diamond characteristics table

样品编号	金刚石编号	颜色	特 征	粒径/mm	重量/mg	备注
XK2	1号	无色透明	曲面八面体与菱形十二面体聚型, 金刚光泽, 内含黑色包裹体	1.0	4.7	见图7
XK2	2号	无色透明	阶梯状八面体双晶, 金刚光泽, 内含黑色包裹体, 有三角凹坑晶面蚀象	1.4	5.10	见图7
XK2	3号	无色透明	八面体双晶, 金刚光泽, 高硬度。	0.8	1.23	见图7
XK2	4号	无色透明	八面体, 金刚光泽, 高硬度。	0.6	0.56	
XK2	5号	无色透明	八面体与菱形十二面体聚型, 金刚光泽, 高硬度, 有三角凹坑晶面蚀象。	0.7	0.9	
XK2	6号	黄色	立方体与八面体聚型, 金刚光泽, 高硬度, 内含黑色包裹体。	0.4	0.22	
XK2	7号	无色透明	平面八面体镶嵌双晶, 金刚光泽, 高硬度, 有三角凹坑晶面蚀象。	0.5	0.38	
XK2	8号	黄色	立方体与八面体聚型, 金刚光泽, 高硬度, 内含黑色包裹体。	0.3	0.13	
XK2	9号	黄色	立方体与八面体聚型, 金刚光泽, 高硬度, 内含黑色包裹体。	0.3	0.12	
XK2	10号	黄色	立方体与八面体聚型, 金刚光泽, 高硬度, 内含黑色包裹体。	0.3	0.14	
XK2	11号	黄色	立方体与八面体聚型, 金刚光泽, 高硬度, 内含黑色包裹体。	0.5	0.37	
XK3	12号	无色	曲面菱形十二面体。	0.8	0.7	
XK3	13号	浅黄色	八面体与立方体聚形。	0.4	0.3	
XK3	14号	浅黄色	八面体与立方体聚形。	0.4	0.2	
XK5	15号	无色透明	扁平八面体, 金刚光泽, 硬度10, 晶体表面有三角形生长纹, 内有黑色包裹体。	1.3	1.6	
XK6	16号	无色透明	呈遭侵蚀的八面体状, 金刚光泽, 硬度10, 晶体表面有溶蚀沟, 金刚石内有黑色包裹体。	0.8	1.0	
XK6	17号	浅黄色	八面体与立方体聚形。	0.3	0.2	
XK7	18号	无色透明	扁平八面体, 金刚光泽, 硬度10, 内有黑色包裹体。	0.5	0.5	见图7

体聚型8颗, 曲面菱形十二面体聚型1颗、阶梯状八面体1颗, 八面体3颗、扁平八面体3颗。

3 结 论

(1) 石榴子石 Gurney 图中贫钙线左侧 $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 4\%$ 的 G10 组石榴子石为含金刚石方辉橄榄岩石榴子石, 可作为石榴子石的标型特征; 西峪矿区岩管群深部 G10 组占 42.86%, 指示金伯利岩中金刚石的存在。红旗 15-1 号岩脉中 1 粒含钠镁-铁铝榴石为含金刚石金伯利岩。

(2) 西峪岩管群深部样品中 S1 组、S2 组、S6 组铬

铁矿是与金刚石共生的铬铁矿, 它们对金刚石的存在具有较好的指示意义, S4 组、S5 组为非金伯利岩成因铬铁矿。红旗 15-1 号 S6 组铬铁矿指示其来自金伯利岩。

(3) 根据西峪岩管群铬透辉石 $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 1.2\%$ 的数量关系, 深部矿体平均品位略低于地表矿体平均品位, 充分证明通过铬透辉石可以定性地推断金伯利岩的含矿性。

(4) 根据石榴子石、铬铁矿、铬透辉石等指示矿物含量, 可大致推断金刚石原生矿的存在及含矿性。结合 CSAMT、钻探等地质工作, 在西峪岩管群

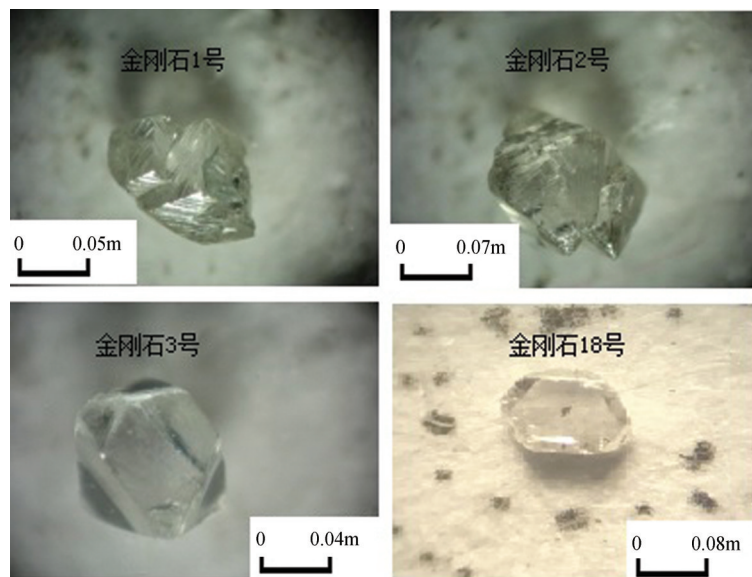


图7 西峪岩管群深部选获的典型金刚石

Fig. 7 Typical diamond selected from the deep part of Xiyu rock pipe group

深部-205m以下找到金刚石原生矿,在外围通过槽探工程发现红旗15-1岩脉,并在选矿样中选获18颗金刚石,充分证明了根据金刚石指示矿物找矿方法,定性预测金伯利岩含矿性的有效性和可行性。

致谢:成文过程中,得到山东省第七地质矿产勘查院艾计泉、褚志远等工程师的指导与帮助,在此表示诚挚的谢意。

参考文献

- [1]董振信. 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, 1991, 10(3):255-264.
- [2]赵秀芳. 鲁西白彦砾岩中金刚石特征及来源探讨[J]. 山东国土资源, 2016, 32(4):27-31.
- [3]迟广成, 伍月, 胡建飞. 山东蒙阴金伯利岩中石榴子石特征及种类划分[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(5):877-884.
- [4]周秀仲, 黄蕴慧, 秦淑英, 等. 山东、辽宁金伯利岩中石榴子石的类

型、标型特征及其与金刚石的关系[J]. 岩石矿物学杂志, 1991, 10(3): 252-264.

- [5]Dawson J B, Stephens W E. Statistical Classification of Garnets from Kimberlite and Associated Xenoliths[J]. Journal of Geology, 1975, 84(4): 495-496.

- [6]Gurney J J, Glover J E, Harris P G. A correlation between garnets and diamonds, kimberlite occurrence and origin: a basis for conceptual models in exploration[J]. Geology Department, University Extension, University of Western Australia, Publ., 1984, 8:143-166.

- [7]声宣, 任喜荣, 朱源, 等. 山东金刚石地质[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1999: 25-43.

- [8]张安棣, 谢锡林, 郭立鹤, 等. 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, 1991.

- ①任喜荣, 冯秀兰, 杜培, 等. 山东金伯利岩指示矿物综合研究. 1988.