

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

西藏罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿石中的合金成分

白文吉 杨经绥 方青松 颜秉刚 张仲明

国土资源部大陆动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

内容提要 从西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带的罗布莎豆荚状铬铁矿床中, 揭示出包含70~80种矿物的一个地幔矿物群, 其中特别引人注意的是含有多种合金。本文报道了已发现的合金类型和它们的化学成分。这些合金矿物主要通过人工重砂选矿提取的, 少数合金在矿石光片中可以见到。本文报道的部分合金系有: Ni(Fe)-C-Cr系, W-Cr-Co系, Al-Fe-La系, Fe-Si-Ti系, Ag-Sn-Si系, Ni-Ir-Fe系, Fe-Pd-Pt系, Fe-Ni-C系。这些碳化物、金属硅以及铁合金等表明它们形成于还原环境, 然而主岩铬铁矿石则形成于氧化环境, 认为罗布莎铬铁矿是从玻安质岩浆中结晶的。这样合金矿物可能是外来晶体; 或者它们形成于地核被后来上升的地幔柱带到浅部, 包在铬铁矿中; 或者是滞留在地幔中的成核物质后来被铬铁矿捕获。

关键词 合金矿物 铬铁矿 蛇绿岩 西藏

Melville 于1892年在 Oregon 的 Josephine 县发现了 Josephinite, 主要含有 Fe-Ni 合金、镁硅酸盐, 伴生铁族元素合金和 Fe-Ni-Co 合金, 产于仰冲蛇绿岩块的橄榄岩中(Bird et al., 1975)。近些年来不断地发现蛇绿岩中的自然元素和合金矿物, 例如在远东 Koryak 高原的蛇绿岩中发现自然元素矿物: Fe、Cu、Al、Sn、Pb; 合金: Cu-Zn, Cu-Ni 以及 Sn-Sb 等(Rudashevsky et al., 1983, 1988; Dmitrenko et al., 1985)。又如在乌拉尔肯皮赛(Kempirsai)蛇绿岩和铬铁矿中也发现铂族元素矿物及其合金(Melcher et al., 1997), 在新喀里多尼亚(New Caledonia)蛇绿岩中发现铂族元素矿物及其合金(Auge et al., 1995)。特别是 Makeyev(1992)总结了乌拉尔地区来自蛇绿岩(阿尔卑斯型岩体)的矿物有200多种, 其中包括自然元素矿物和多种贱金属合金, 如: Au、Cu、Pd、Ag、Ir、Os、Pt、Fe、Cr; 合金有: Cu-Au、Pd-Au、Ag-Cu、Zn-Cu、Au-Ag、Pt-Zn、Ni-Pt、Pt-Fe、Cr-Fe、Fe-Ni 以及 Cr-Al 等。总之, 最近越来越重视蛇绿岩和铬铁矿中的元素矿物和合金研究。笔者曾报道过西藏罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿石中的铂族元素矿物和合金(Bai et al., 2000)。现将近期发现的部分合金系列再补充报道, 相信这些合金对地幔的物质成分乃至地核的物质成分的认识是有益的。

1 地质背景

含有合金的铬铁矿床, 位于雅鲁藏布江蛇绿岩带(缝合带)的东端, 在拉萨市东南200 km 的罗布莎村(29°5'N, 92°5'E)。罗布莎铬铁矿床正在开采中。罗布莎蛇绿岩块的北界与岗底斯岩基(Gangdese Batholith)呈断层接触, 并且被第三纪罗布莎群掩盖, 岩块南界为断层并与三叠系直接接触。

罗布莎含铬铁矿床的蛇绿岩块, 由地幔方辉橄榄岩、堆晶岩和蛇纹混杂岩组成, 由于断层作用而缺失岩墙群和基性熔岩。蛇绿岩块走向长42 km, 呈EW向延伸, 南北最大宽4 km, 面积约70 km²。豆荚状铬铁矿分布于方辉橄榄岩相中, 矿床特征完全符合于 Thayer(1964)豆荚状矿床特征(图1)。

罗布莎豆荚状矿床矿石储量约500万吨, 主要由块状、豆状和浸染状矿石组成。该矿床最大特点是造矿铬尖晶石为高-Cr 铬尖晶石, 其 Cr₂O₃ 含量在59%~68%, 但是相对矿体围岩(母岩)方辉橄榄岩的副矿物铬尖晶石 Al₂O₃ 含量很高(Zhou et al., 1992; Bai et al., 2000), 因而铬铁矿体对母岩而言具有外来性质, 被推断是来自地幔深部的矿体(Bai et al., 2000)。

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 49972073)资助成果。

收稿日期: 2004-02-21; 改回日期: 2004-05-10; 责任编辑: 刘淑春。

作者简介: 白文吉, 男, 1935年生。长期从事镁铁—超镁铁岩及有关矿产研究, 对蛇绿岩和铬铁矿研究较多。通讯地址: 100037, 中国地质科学院地质研究所。

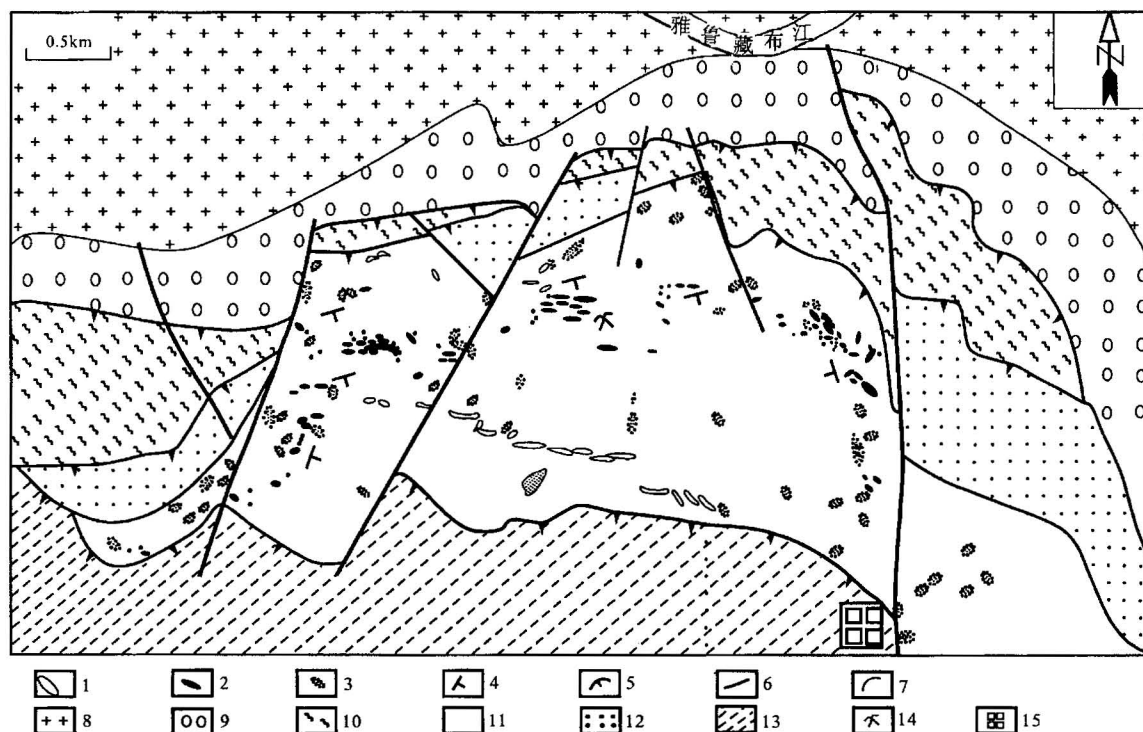


图 1 西藏罗布莎蛇绿岩地质略图(据 Zhou, 1995; 白文吉等, 2000)

Fig. 1 Geological map of Luobusa ophiolite, Tibet (after Zhou, 1995; Bai et al., 2000)

- 1—辉长岩脉; 2—铬铁矿体; 3—纯橄榄岩透镜体; 4—流面产状; 5—推覆断层; 6—断层; 7—不整合; 8—花岗岩; 9—第三系;
10—蛇绿混杂岩; 11—方辉橄榄岩; 12—堆晶岩; 13—三叠纪复理石; 14—矿山; 15—罗布莎村
- 1—Gabbro dykes; 2—chromitite ore bodies; 3—dunite lens; 4—strike and dip of foliation; 5—thrust; 6—fault; 7—unconformity;
8—granite; 9—Tertiary; 10—ophiolitic melange; 11—harzburgite; 12—cumulate; 13—Triassic flysch; 14—mine; 15—Luobusa village

2 选矿流程和分析技术

笔者曾于1996年到野外进行罗布莎铬铁矿床地质调查,并于罗布莎矿山 No31号矿体取样1500 kg。样品采自矿井的深部并立刻装袋(避免大气的污染)。块状矿石经实验室清洗后粉碎成直径1 cm 的样品,包装后运往郑州国土资源部矿产综合利用研究所进行选矿。所使用的设备从未选过超基性岩、金伯利岩。在选矿开始之前,曾用500 kg 花岗岩做先期选矿,以期消除可能的设备中的任何金刚石的污染,证实花岗岩精矿中无金刚石。

样品初始粒径1 cm,经碎矿、重选、磁选、浮选和电选多种程序,选出公斤级的精矿,然后人工用小掏砂盘淘选,选出精矿在双目镜下提取金刚石(20余粒)和各种重矿物,包括合金。

将合金等矿物颗粒镶嵌在铜台上,磨制成光面,用日本日立公司(HITACHI)生产的 S-3500N 型扫描电镜(Scanning Electron Microscopes)连接一台英国牛津公司(OXFORD)生产的 INCA 能谱仪,在北

京矿山冶金研究总院电子探针室陶淑风高级工程师帮助下完成化学成分测定。测试条件:加速电压20 kV,电流15 nA,角度35°,时间30~50 s,工作距离15 mm。分析使用 SW9100 NOST 多元标样程序,用 Co 标样验证校正。笔者曾将部分 INCA 分析结果与用日本产 JXA8800R 电子探针分析结果核对,两种仪器分析结果大致相似(电子探针分析由中国地质科学院矿床研究所周剑雄教授分析)。INCA 能谱分析的总量被归化成100%。

3 合金系列

3.1 Ni-Fe-Cr-C 系

在罗布莎铬铁矿石中赋存由 Ni, Fe, Cr 和 C 四种元素组成的合金。该合金为圆粒状,银白色,金属光泽,粒径<200 μm。为了在三元系图解上反映主要成分变化,将 Fe 和 Ni 合并。在图2(a)中,该类合金至少可划分出3个亚类:C-Cr 合金, Ni-C 合金和 Ni-C-Cr 合金。在显微镜下观察光片,3种合金互相组成交生(Intergrowth)结构(图版 I-1)和鬃刺结

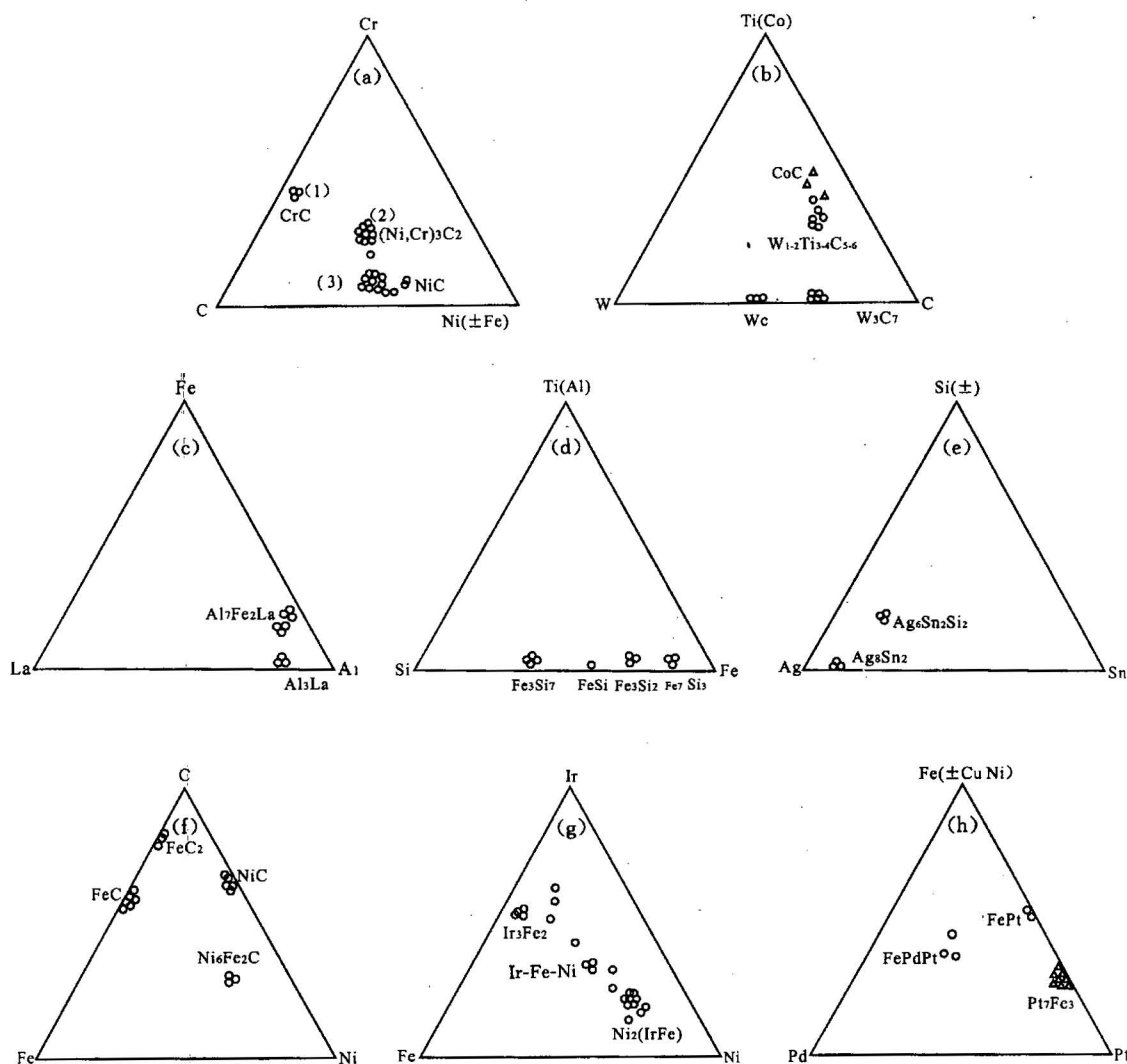


图 2 罗布莎铬铁矿中的合金系的化学成分图解(原子百分比;%)

Fig. 2 Diagrams of chemical compositions of alloy system from the Luobusa chromitites (at, %)

构(Spinifex structure)(图版 I-2)。罗布莎的 Ni(Fe)-Cr-C 合金除由上述 3 种成分合金组成外,尚含有 C(石墨?)的出溶体呈蠕虫状分布(图版 I-2, 黑色蠕虫状矿物)。该合金系的基质为含 Cr 低的合金,而片晶(Lamella)含 Cr 略高。该系合金化学成分列入表 1,图中的分析点号与表 1 中的分析点号相同(下同)。

3.2 W-Ti-C 系

在罗布莎铬铁矿石中分离出 W-Ti-C 系合金,该合金以 W 为主,为灰白色金属光泽的粒状合金,粒径 200~300 μm 。合金的主要组成元素 W 含量有较大变化(40%~100%),相应 C 和 Ti 含量变化亦较广。

在显微镜下观察,一个大颗粒是由众多细粒组成的聚晶(图版 I-3),因而在对该矿物做单晶 X-光

衍射分析时收不到衍射的信息。W-Ti-C 系合金,除 Ti 和 C 外,还含有 Co,Co 恰是地幔元素。将 W-Ti-C 合金化学成分列入表 2 中。在三组分图解中该合金被划分出三类(图 2b),即 WC, W_3C_7 和 CTiW 合金,此外尚有 CoC 合金(图 2b,三角标志)。

3.3 Al-Fe-La 系

一种特殊的 Al-Fe-La 合金出现在罗布莎豆荚状铬铁矿石中,经多个颗粒观察,该合金为粒状,深灰色,具弱金属光泽,粒径为 200 μm 。特别对罗布莎的 Al-Fe-La 合金进行了波谱(电子探针)和能谱二重分析,分析结果差值较小。该矿物主要由 Al 组成,其次为 Fe 和 La,Al-Fe-La 系合金的化学成分列入表 3。

Al-Fe-La 系合金也具有交生结构或连生体特征,所以一粒较大合金包容了成分不同的 3 个亚类

表 1 罗布莎铬铁矿中 Ni-Fe-Cr-C 合金代表性成分

Table 1 Representative compositions of Ni-Fe-Cr-C alloys from the Luobusa

样品 编号	重量百分比(%)					原子百分比(%)			
	Fe	Ni	C	Cr	总量	Fe	Ni	C	Cr
1-23-1	2.84	15.19	23.45	58.51	100.00	1.50	7.64	57.64	33.22
1-23-2	2.97	9.52	20.28	67.41	100.00	1.56	5.07	52.82	40.55
1-23-3	2.93	15.00	20.26	61.81	100.00	1.65	8.03	52.99	37.34
1-23-4	5.83	70.82	13.92	9.42	100.00	3.73	6.82	44.40	45.41
1-18-2	42.20	13.60	11.60	32.60	100.00	29.29	8.98	37.43	24.30
1-18-2	42.02	13.49	12.29	32.20	100.00	28.67	8.76	38.98	23.59
1-18-3	42.31	13.80	12.02	31.87	100.00	29.07	9.02	38.40	23.52
1-18-4	41.76	14.97	11.68	31.60	100.00	28.95	9.87	37.64	23.53
1-18-5	44.12	16.04	12.41	27.43	100.00	30.11	10.41	39.39	20.11
1-18-6	42.86	21.68	12.63	22.83	100.00	29.21	14.06	40.02	16.71
1-18-10	33.82	51.43	12.63	2.12	100.00	23.53	34.03	40.85	1.58
1-18-11	31.29	54.15	11.88	2.68	100.00	22.21	36.56	39.19	2.04
1-17-1	68.05	6.63	16.62	8.70	100.00	42.27	3.92	48.01	5.81
1-17-2	68.59	6.18	15.45	9.78	100.00	43.75	3.75	45.80	6.70
1-17-3	71.58	5.21	17.01	6.21	100.00	44.11	3.05	48.73	4.11
1-17-4	59.45	22.46	15.31	2.78	100.00	38.35	13.78	45.94	1.93
1-17-5	50.21	26.21	15.54	2.12	100.00	35.95	16.05	46.53	1.47
1-17-6	62.80	16.94	16.80	3.46	100.00	39.06	10.02	48.60	2.31

分子式: 1-23-1: $\text{C}_{0.58}\text{Fe}_{0.33}\text{Ni}_{0.08}\text{Fe}_{0.01}$; 1-23-2: $\text{C}_{0.53}\text{Ni}_{0.5}\text{Cr}_{0.41}\text{Fe}_{0.01}$; 1-23-3: $\text{C}_{0.53}\text{Cr}_{0.37}\text{Ni}_{0.08}\text{Fe}_{0.02}$; 1-23-4: $\text{C}_{0.45}\text{Cr}_{0.44}\text{Ni}_{0.07}\text{Fe}_{0.04}$; 1-18-1: $\text{C}_{0.37}\text{Fe}_{0.29}\text{Cr}_{0.24}\text{Ni}_{0.10}$; 1-18-2: $\text{C}_{0.39}\text{Fe}_{0.29}\text{Cr}_{0.24}\text{Ni}_{0.08}$; 1-18-3: $\text{C}_{0.38}\text{Fe}_{0.29}\text{Cr}_{0.24}\text{Ni}_{0.09}$; 1-18-4: $\text{C}_{0.38}\text{Fe}_{0.29}\text{Cr}_{0.24}\text{Ni}_{0.09}$; 1-18-5: $\text{C}_{0.39}\text{Fe}_{0.30}\text{Cr}_{0.20}\text{Ni}_{0.11}$; 1-18-6: $\text{C}_{0.40}\text{Fe}_{0.29}\text{Cr}_{0.16}\text{Ni}_{0.15}$; 1-18-10: $\text{C}_{0.41}\text{Ni}_{0.34}\text{Fe}_{0.24}\text{Cr}_{0.01}$; 1-18-11: $\text{C}_{0.39}\text{Ni}_{0.37}\text{Fe}_{0.22}\text{Cr}_{0.02}$; 1-17-1: $\text{C}_{0.48}\text{Fe}_{0.42}\text{Cr}_{0.06}\text{Ni}_{0.04}$; 1-17-2: $\text{C}_{0.46}\text{Fe}_{0.44}\text{Cr}_{0.07}\text{Ni}_{0.03}$; 1-17-3: $\text{C}_{0.49}\text{Fe}_{0.44}\text{Cr}_{0.04}\text{Ni}_{0.03}$; 1-17-4: $\text{C}_{0.46}\text{Fe}_{0.38}\text{Ni}_{0.14}\text{Cr}_{0.02}$; 1-17-5: $\text{C}_{0.47}\text{Fe}_{0.35}\text{Ni}_{0.16}\text{Cr}_{0.01}\text{Zn}_{0.01}$; 1-17-6: $\text{C}_{0.49}\text{Fe}_{0.39}\text{Ni}_{0.10}\text{Cr}_{0.02}$ 。

合金。在电镜下观察光片, 浅色部分含 La 最低(-6 at%), 灰色部分含 La 略高(-9 at%), 而暗色部分含 La 最高(-23 at%), 这3种成分变动的合金组成一个较大颗粒(图版 I-4)。3种不同成分的合金在三

元系图解上都靠近自然 Al(图2c)。

3.4 Fe-Si-Ti 系

在罗布莎铬铁矿石中较常见的合金之一为 Fe-Si 系, Fe-Si 系矿物除主要组分 Fe 和 Si 外, 尚含有一定量的 Al 和 Ti 杂质。该系矿物粒径较大, 可达 1000 μm , 矿物为黑色, 具强金属光泽。

在 Fe-Si 系中, 已经确定出一种合金, 即 Fe 含量 44.43%~45.37%, Si 含量 55.52%~56.16%, 大致分子式为 Fe_3Si_7 (Hu, 1999)。在 Fe-Si-Ti 三元系图解上见到 Fe_3Si_7 , $\text{FeSiFe}_3\text{Si}_2$ 和 Fe_7Si_3 合金(图2d)。这4种 Fe-Si 合金含少许 Al 和 Ti。 Fe_3Si_7 合金在西伯利亚 Yakutia 金伯利岩中曾被发现 (Mathez et al., 1995)。罗布莎的 Fe-Si-Ti(Al) 系合金有的颗粒不具交生结构(图版 I-5)。铬铁矿中除 Fe Si、 Fe_3Si_2 外, 尚有 Fe_3Si_7 和 Fe_7Si_3 合金, 其化学成分列入表4中。

3.5 Ag-Sn-Si 系

在罗布莎铬铁矿石中赋存 Ag-Sn-Si 系合金, 该合金粒状直径约 200 μm , 为银白色, 具金属光泽。主要成分为 Ag, 其次为 Sn 和 Si, 尚有少量杂质 S 和 As(表5)。在 Ag-Sn-Si 三组分图解上该合金的化学成分更靠近 Ag 端员(图2e), 但分两种, 一种为含 Sn 自然银 (Ag_8Sn_2), 另一种含 Si 的银锡矿 ($\text{Ag}_6\text{Sn}_2\text{Si}_2$)。该合金成分均匀, 并且不具交生结构。

3.6 Fe-Ni-C 系

由 Fe、Ni 和 C 三组分组成的合金见于罗布莎铬铁矿石中, 当一个组分 Ni 和 Fe 含量较少时, 该三元系变成二元系。该系合金为粒状, 灰白色, 金属光泽, 粒径 200~300 μm , 有时由细粒聚合物组成(图版 I-6)。

在 Fe-Ni-C 系三元图解上, 可看出4种成分不同

表 2 罗布莎铬铁矿中 W-Ti-C(Co) 合金化学成分

Table 2 Representative compositions of W-Ti-C(Co) alloys from the Luobusa

样品号	51-14-1	51-14-2	51-14-3	51-14-4	51-14-5	50-13-1	50-13-2	50-13-3	50-13-4	50-13-5	50-13-6	50-13-7	50-13-8	50-13-9
重量百分比(%)														
C	16.60	12.30	11.42	13.31	12.68	12.64	12.43	12.26	13.02	14.46	13.97	16.28	15.16	14.64
W	22.92	27.04	25.65	86.69	87.32	87.36	85.23	87.74	59.03	59.22	58.33	49.24	45.30	40.92
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.95	26.32	27.76	34.48	39.54	44.45
Co	60.49	60.66	62.93	0.00	0.00	0.00	2.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总量	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
原子百分比(%)														
C	54.55	46.54	44.06	70.15	68.97	68.89	67.27	68.14	54.51	58.00	56.50	57.85	54.07	51.44
W	4.92	6.68	6.46	29.85	31.03	31.11	31.15	31.86	16.15	15.52	15.41	11.43	10.56	9.39
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.34	26.48	28.09	30.72	35.37	39.17
Co	40.52	46.77	49.47	0.00	0.00	0.00	2.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

分子式: 51-14-1: $\text{C}_{0.54}\text{Co}_{0.4}\text{W}_{0.05}$; 51-14-2: $\text{C}_{0.47}\text{Co}_{0.48}\text{W}_{0.5}$; 51-14-3: $\text{Co}_{0.5}\text{C}_{0.44}\text{W}_{0.06}$; 51-14-4: $\text{W}_{0.87}\text{C}_{0.13}$; 51-14-5: $\text{W}_{0.87}\text{C}_{0.13}$; 50-13-1: $\text{C}_{0.69}\text{W}_{0.31}$; 50-13-2: $\text{C}_{0.67}\text{W}_{0.3}\text{Co}_{0.03}$; 50-13-3: $\text{C}_{0.68}\text{W}_{0.32}$; 50-13-4: $\text{C}_{0.55}\text{Ti}_{0.3}\text{W}_{0.02}$; 50-13-5: $\text{W}_{0.6}\text{Ti}_{0.26}\text{C}_{0.58}$; 50-13-6: $\text{C}_{0.57}\text{Ti}_{0.28}\text{W}_{0.15}$; 50-13-7: $\text{C}_{0.58}\text{Ti}_{0.30}\text{W}_{0.12}$; 50-13-8: $\text{C}_{0.54}\text{Ti}_{0.35}\text{W}_{0.10}$; 50-13-9: $\text{C}_{0.5}\text{Ti}_{0.4}\text{W}_{0.1}$ 。

表3 罗布莎铬铁矿中 Al-Fe-La 合金化学成分
Table 3 Chemical compositions of Al-Fe-La alloys
from Chromitite in the Luobusa

样品 编号	重量百分比(%)				原子百分比(%)		
	Al	Fe	La	总量	Al	Fe	La
32-12-1	43.55	24.59	43.55	100.00	70.68	19.28	10.04
32-12-2	44.20	25.74	30.06	100.00	70.75	19.91	9.35
32-12-3	44.54	24.40	31.06	100.00	71.42	18.90	9.68
32-12-4	39.10	0.00	60.90	100.00	76.78	0.00	23.22
32-12-5	38.99	0.00	61.11	100.00	76.61	0.00	23.39
32-12-6	39.16	0.00	60.84	100.00	77.00	0.00	23.00
32-12-7	51.25	27.10	21.65	100.00	74.77	19.10	6.14
32-12-8	50.75	27.90	21.34	100.00	74.22	19.79	6.06
32-12-9	50.91	27.78	21.31	100.00	74.35	19.60	6.05

分子式: 32-12-1: $\text{Al}_{0.7}\text{Fe}_{0.19}\text{La}_{0.11}$; 32-12-2: $\text{Al}_{0.71}\text{Fe}_{0.2}\text{La}_{0.09}$; 32-12-3: $\text{Al}_{0.71}\text{Fe}_{0.19}\text{La}_{0.1}$; 32-12-4: $\text{Al}_{0.76}\text{La}_{0.24}$; 32-12-5: $\text{Al}_{0.76}\text{La}_{0.24}$; 32-12-6: $\text{Al}_{0.77}\text{La}_{0.23}$; 32-12-7: $\text{Al}_{0.75}\text{Fe}_{0.19}\text{La}_{0.06}$; 32-12-8: $\text{Al}_{0.74}\text{Fe}_{0.2}\text{La}_{0.06}$; 32-12-9: $\text{Al}_{0.74}\text{Fe}_{0.2}\text{La}_{0.06}$ 。

表4 罗布莎铬铁矿中 Fe-Si-Mn (Ti, Al) 合金代表性成分

Table 4 Representative compositions of Fe-Si-Mn (Ti, Al) alloys from the chromitites in the Luobusa

样品编号	41-10-3	41-10-4	41-10-5	41-10-6	38-17-1	38-17-2	38-17-3	32-3-9-1	32-3-9-2	68-22-1	68-22-2	68-22-3
重量百分比(%)												
Si	22.72	22.87	21.77	22.00	13.39	13.58	13.17	54.42	55.22	33.83	49.11	52.84
Fe	72.52	72.84	74.33	73.90	83.54	83.08	84.04	45.58	44.78	66.17	50.18	46.53
Ti	4.75	4.29	3.90	4.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56	0.69	0.43	0.00	0.00	0.00	0.71	0.63
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	2.64	2.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总量	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
原子百分比(%)												
Si	36.66	36.88	35.43	35.73	22.97	23.23	22.66	70.36	71.03	50.41	65.74	69.02
Fe	58.84	59.07	60.84	60.36	72.07	71.46	72.73	29.64	28.97	49.59	33.78	30.56
Ti	4.50	4.05	3.73	3.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.60	0.38	0.00	0.00	0.00	0.48	0.00
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	4.47	4.71	4.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

分子式: 41-10-3: $\text{Fe}_{0.6}\text{Si}_{0.36}\text{Ti}_{0.44}$; 41-10-4: $\text{Fe}_{0.6}\text{Si}_{0.37}\text{Ti}_{0.03}$; 41-10-5: $\text{Fe}_{0.6}\text{Si}_{0.35}\text{Ti}_{0.05}$; 41-10-6: $\text{Fe}_{0.6}\text{Si}_{0.36}\text{Ti}_{0.04}$; 38-17-1: $\text{Fe}_{0.72}\text{Si}_{0.23}\text{Mn}_{0.05}$; 38-17-2: $\text{Fe}_{0.71}\text{Si}_{0.23}\text{Al}_{0.04}\text{Mn}_{0.02}$; 38-17-3: $\text{Fe}_{0.72}\text{Si}_{0.23}\text{Al}_{0.04}\text{Mn}_{0.01}$; 32-3-9-1: $\text{Si}_{0.71}\text{Fe}_{0.29}$; 68-22-1: $\text{Si}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}$; 68-22-2: $\text{Si}_{0.66}\text{Fe}_{0.33}$; 68-22-3: $\text{Si}_{0.69}\text{Fe}_{0.3}\text{Mn}_{0.01}$ 。

表5 罗布莎铬铁矿中的 Ag-Sn-Si (S) 合金化学成分

Table 5 Chemical compositions of Ag-Sn-Si (S) alloys
from chromitite in the Luobusa

样品 编号	重量百分比(%)					原子百分比(%)			
	Ag	Sn	Si	S	总量	Ag	Sn	Si	S
36-14-1	68.27	25.35	5.23	1.16	100.00	59.23	19.98	17.41	3.37
36-14-2	67.72	25.42	5.35	1.51	100.00	58.63	20.00	17.81	3.56
36-14-3	67.66	25.56	5.15	1.63	100.00	58.59	20.11	17.14	4.17
36-14-4	82.12	17.88	0.00	0.00	100.00	83.48	16.52	0.00	0.00
36-14-5	83.42	16.58	0.00	0.00	100.00	84.70	15.30	0.00	0.00
36-14-6	81.94	18.08	0.00	0.00	100.00	83.31	16.69	0.00	0.00
36-14-7	82.07	17.93	0.00	0.00	100.00	83.43	16.57	0.00	0.00

分子式: 36-14-1: $\text{Ag}_{0.59}\text{Sn}_{0.2}\text{Si}_{0.21}$; 36-14-2: $\text{Ag}_{0.59}\text{Sn}_{0.20}\text{Si}_{0.21}$; 36-14-3: $\text{Ag}_{0.59}\text{Sn}_{0.2}\text{Si}_{0.21}$; 36-14-4: $\text{Ag}_{0.83}\text{Sn}_{0.17}$; 36-14-5: $\text{Ag}_{0.85}\text{Sn}_{0.15}$; 36-14-6: $\text{Ag}_{0.83}\text{Sn}_{0.17}$; 36-14-7: $\text{Ag}_{0.83}\text{Sn}_{0.17}$ 。

的合金, 即 Ni-C 合金 ($\text{Ni}_{0.5}\text{C}_{0.5}$)、Fe-C 合金 ($\text{Fe}_{0.5}\text{C}_{0.5}$)、C-Fe 合金 ($\text{C}_{0.66}\text{Fe}_{0.33}$) 以及 Ni-Fe-C 合金 (图 2f)。Fe-Ni-C 合金的化学成分列入表 6 中。

在 Fe-Ni-C 合金中普遍分布蠕虫状出溶片晶 (Lamella), 呈雪花状出现, 而基质 Fe-Ni-C 合金具有骨格状结构 (图版 I-2)。除 C 出溶外, 基质的化学成分是均匀的。

3.7 Ni-Ir-Fe 系

由贱金属 Ni、Fe、Cu 以及少量 Cr、Mg 与贵金属 Ir 组成的合金在罗布莎铬铁矿中常常见到。该系矿物的三组分图表明, Ni 和 Ir 含量变化较广, 而 Fe 含量相对较稳定 (15%~25%)。表 7 列出了罗布莎 Ni-Ir-Fe 系合金化学成分。Ni-Ir-Fe 合金可以被划分成 3 种成分略有不同的合金, 即: $\text{Ni}_2(\text{IrFe})$ 合金, Ir-

Fe-Ni 合金和 Ir_3Fe_2 合金。但是在 Ir-Ni 之间呈连续变化, 可能存在任意比例的 Ni-Ir 合金 (图 2g)。Ni-Ir-Fe 合金常与自然钼组成交生结构 (图版 I-7)。

3.8 Fe-Pd-Pt 系

此系列合金以 Fe 为主, Pt 和 Pd 为次要成分, 在罗布莎铬铁矿中为常见矿物。除上述三组分外, 还含少量 Ni 和 Cu (表 8)。将该合金的贱金属合并组成三元系图解反映本系中合金组成的变化 (图 2h)。罗布莎豆荚状铬铁矿中的 Pd-Pt 合金曾被报道过, 分子式为: $\text{Pt}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$ 的合金 (Bai et al., 2000)。在三组分图中以三角形标志出来 (图 2h)。本文补充报道另外二种成分不同的该系合金, 即分子式为: $\text{Pt}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}$ 以及 $\text{Pd}_{0.38}\text{Fe}_{0.28}\text{Pt}_{0.27}$ 合金 (图 2h, 表 8)。

表 6 罗布莎铬铁矿中的 Fe-Ni-C 合金化学成分

Table 6 Representative compositions of Fe-Ni-C alloys from the chromitite

样品编号	1-5-1	1-5-2	1-5-3	1-14-1	1-14-2	1-14-3	1-7-1	1-7-2	1-7-3	23-15-1	23-15-2	23-15-3	1-54	1-5-5	1-5-6	1-5-10	1-17-4	1-17-5
重量百分比(%)																		
Fe	81.83	85.09	84.72	85.46	85.97	86.22	1.81	1.93	2.31	24.70	23.85	24.17	90.60	90.55	90.27	83.84	2.09	2.04
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.85	81.04	80.89	72.25	72.56	72.99	0.00	0.00	0.00	0.00	79.07	77.90
C	18.17	14.91	15.28	14.54	14.03	13.78	16.35	17.03	16.80	3.06	3.59	2.85	9.40	9.45	9.73	16.16	18.84	20.06
总量	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
分子百分比(%)																		
Fe	49.20	55.10	54.39	55.84	56.86	57.38	1.16	1.22	1.47	22.94	21.77	22.62	67.46	67.33	66.63	52.74	1.26	1.20
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.02	48.73	48.90	63.84	62.99	64.98	0.00	0.00	0.00	0.00	45.61	43.74
C	50.80	44.90	45.61	44.16	43.14	42.62	46.82	50.05	49.63	13.21	15.24	12.40	32.54	32.67	33.37	47.26	53.13	55.06

分子式: 1-5-1: $\text{Fe}_{0.5}\text{C}_{0.5}$; 1-5-2: $\text{Fe}_{0.5}\text{C}_{0.5}$; 1-5-3: $\text{Fe}_{0.54}\text{C}_{0.46}$; 1-14-1: $\text{Fe}_{0.56}\text{C}_{0.44}$; 1-14-2: $\text{Fe}_{0.57}\text{C}_{0.43}$; 1-14-3: $\text{Fe}_{0.57}\text{C}_{0.43}$; 1-7-1: $\text{Ni}_{0.5}\text{C}_{0.5}$; 1-7-2: $\text{C}_{0.5}\text{Ni}_{0.48}\text{Fe}_{0.02}$; 1-7-3: $\text{C}_{0.5}\text{Ni}_{0.49}\text{Fe}_{0.01}$; 23-15-1: $\text{Ni}_{0.64}\text{Fe}_{0.23}\text{C}_{0.13}$; 23-15-2: $\text{Ni}_{0.63}\text{Fe}_{0.22}\text{C}_{0.15}$; 23-15-3: $\text{Ni}_{0.64}\text{Fe}_{0.23}\text{C}_{0.12}$; 1-5-4: $\text{Fe}_{0.67}\text{C}_{0.33}$; 1-5-5: $\text{Fe}_{0.67}\text{C}_{0.33}$; 1-5-6: $\text{Fe}_{0.67}\text{C}_{0.33}$; 1-5-10: $\text{Fe}_{0.53}\text{C}_{0.47}$; 1-17-4: $\text{Ni}_{0.46}\text{C}_{0.53}\text{Fe}_{0.01}$; 1-17-5: $\text{Ni}_{0.44}\text{C}_{0.55}\text{Fe}_{0.01}$ 。

表 7 罗布莎铬铁矿中的 Ni-Fe 合金化学成分

Table 7 Representative compositions of Ni-Fe alloys from the chromitites in the Luobusa

样品编号	重量百分比(%)					分子百分比(%)			
	Ni	Cu	Fe	Ir	总量	Ni	Cu	Fe	Ir
9-11-1	0.40	1.74	16.87	80.99	100.00	0.90	3.61	39.87	55.62
9-11-2	0.51	5.01	8.76	85.73	100.00	1.25	11.41	22.73	64.61
9-11-3	1.73	1.61	14.85	81.81	100.00	3.95	3.39	35.63	57.02
9-11-4	1.71	1.34	16.00	80.95	100.00	3.85	2.78	37.79	55.58
44-2-3	38.37	0.00	10.87	50.76	100.00	58.75	0.00	17.50	23.74
44-2-4	42.57	0.00	11.27	46.16	100.00	62.12	0.00	17.29	20.58
44-2-7	28.66	0.00	9.42	61.92	100.00	49.86	0.00	17.23	32.91
44-2-8	32.47	0.00	11.86	55.67	100.00	52.41	0.00	20.13	27.45
24-16-1	41.34	0.00	10.90	46.76	100.00	61.34	0.00	17.07	21.65
22-16-2	24.69	0.00	13.95	61.37	100.00	42.50	0.00	25.24	32.27
24-16-3	23.38	0.00	13.77	62.84	100.00	40.98	0.00	25.38	33.64
24-14-1	48.76	0.00	11.09	40.15	100.00	67.09	0.00	16.04	16.87
24-14-2	49.23	0.00	10.28	40.49	100.00	68.00	0.00	14.92	17.08
24-14-3	41.34	0.00	10.90	47.76	100.00	61.34	0.00	17.01	21.65
24-11-1	37.88	0.00	10.39	51.72	100.00	58.64	0.00	16.91	24.45
24-11-2	39.37	0.00	10.01	50.61	100.00	60.24	0.00	16.11	23.65
24-11-3	39.91	0.00	11.43	48.66	100.00	59.75	0.00	17.99	22.26
9-2-1	49.78	0.00	11.18	39.04	100.00	67.77	0.00	16.00	16.23
9-2-2	49.77	0.00	11.68	38.55	100.00	67.42	0.00	15.63	15.95
9-2-3	47.82	0.00	14.78	37.40	100.00	63.94	0.00	20.78	15.28

分子式: 9-11-1: $\text{Ir}_{0.56}\text{Fe}_{0.4}\text{Cu}_{0.03}\text{Ni}_{0.01}$; 9-11-2: $\text{Ir}_{0.65}\text{Fe}_{0.23}\text{Cu}_{0.11}\text{Ni}_{0.01}$; 9-11-3: $\text{Ir}_{0.57}\text{Fe}_{0.36}\text{Ni}_{0.04}\text{Cu}_{0.03}$; 9-11-4: $\text{Ir}_{0.56}\text{Fe}_{0.38}\text{Ni}_{0.04}\text{Cu}_{0.02}$; 44-2-3: $\text{Ni}_{0.59}\text{Ir}_{0.24}\text{Fe}_{0.17}$; 44-2-4: $\text{Ni}_{0.62}\text{Ir}_{0.21}\text{Fe}_{0.17}$; 44-2-7: $\text{Ni}_{0.5}\text{Ir}_{0.33}\text{Fe}_{0.17}$; 44-2-8: $\text{Ni}_{0.52}\text{Ir}_{0.27}\text{Fe}_{0.21}$; 24-16-1: $\text{Ni}_{0.61}\text{Ir}_{0.22}\text{Fe}_{0.17}$; 24-16-2: $\text{Ni}_{0.43}\text{Ir}_{0.32}\text{Fe}_{0.25}$; 24-16-3: $\text{Ni}_{0.41}\text{Ir}_{0.34}\text{Fe}_{0.25}$; 24-14-1: $\text{Ni}_{0.67}\text{Ir}_{0.17}\text{Fe}_{0.16}$; 24-14-2: $\text{Ni}_{0.68}\text{Ir}_{0.17}\text{Fe}_{0.15}$; 24-14-3: $\text{Ni}_{0.61}\text{Ir}_{0.22}\text{Fe}_{0.17}$; 24-11-1: $\text{Ni}_{0.59}\text{Ir}_{0.24}\text{Fe}_{0.17}$; 24-11-2: $\text{Ni}_{0.6}\text{Ir}_{0.24}\text{Fe}_{0.16}$; 24-11-3: $\text{Ni}_{0.6}\text{Ir}_{0.22}\text{Fe}_{0.18}$ 。

有意义的是 $\text{Pt}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}$ 合金中包含一粒砷钼矿自形晶包裹体,表明砷钼矿形成早于 $\text{Pt}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}$ 合金,可见砷化物不是蛇纹石化阶段的产物或热液成因。经过电子探针分析该砷钼矿分子式大致为 Pd_3As_2 。

表 8 罗布莎铬铁矿中的 Fe-Pd-Pt 合金化学成分

Table 8 Chemical compositions of Fe-Pd-Pt alloys from the chromitites in the Luobusa

样品编号	23-28-1	23-28-2	23-28-3	23-181-3	23-181-4	17-9
重量百分比(%)						
Ni	1.23	1.88	0.97	6.12	6.48	0.00
Cu	3.19	3.14	3.52	5.18	5.48	0.00
Fe	13.50	13.33	13.62	12.32	12.54	10.20
Pd	33.28	35.38	35.44	0.00	0.00	0.00
Pt	48.80	46.26	46.45	76.37	75.50	89.80
总量	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
分子百分比(%)						
Ni	2.39	3.61	1.87	5.18	13.66	0.00
Cu	5.73	5.55	6.24	6.12	10.68	0.00
Fe	27.60	26.83	27.50	12.32	27.78	28.41
Pd	35.72	37.37	37.56	0.00	0.00	0.00
Pt	28.56	26.64	26.84	76.37	47.89	71.59

分子式: 23-28-1: $\text{Pd}_{0.36}\text{Pt}_{0.29}\text{Fe}_{0.27}\text{Cu}_{0.06}\text{Ni}_{0.02}$; 23-28-2: $\text{Pd}_{0.37}\text{Pt}_{0.27}\text{Fe}_{0.27}\text{Cu}_{0.06}\text{Ni}_{0.04}$; 23-28-3: $\text{Pd}_{0.38}\text{Fe}_{0.28}\text{Pt}_{0.27}\text{Cu}_{0.06}\text{Ni}_{0.02}$; 23-181-3: $\text{Pt}_{0.49}\text{Fe}_{0.28}\text{Ni}_{0.13}\text{Cu}_{0.1}$; 23-181-4: $\text{Pt}_{0.48}\text{Fe}_{0.28}\text{Ni}_{0.13}\text{Cu}_{0.11}$; 17-9: $\text{Pt}_{0.72}\text{Fe}_{0.28}$ 。

4 讨论

西藏雅鲁藏布江缝合带内发育巨大地幔橄榄岩块、堆晶岩块和熔岩岩块,无争议地普遍认为它们是蛇绿岩的仰冲岩块。西藏地幔橄榄岩中豆荚状铬铁矿特征与 Thayer(1964)描述的相同。在西藏豆荚状铬铁矿石中已分离出 60~70 种矿物,包括硅酸盐、硫(砷)化物、氧化物、自然元素矿物、碳化物和贵金属与贱金属合金(Bai et al., 2000)。这些矿物来自于蛇绿岩块的地幔橄榄岩中的铬铁矿体,因而豆荚状矿体无疑是地幔矿物的储存库,60~70 种矿物组成了蛇绿岩(古大洋岩石圈)地幔矿物群(Bai et al., 2000)。因而豆荚状高 Cr 铬铁矿石是寻找地幔矿物的良好母岩。在豆荚状铬铁矿中,除找到合金外,还

- Melville W. 1892. Josephinite, a new nickel-iron. *Am. J. Sci.*, 43: 509.
- Melcher F, Grum W, Simon G, Thalhammer T V, Stumpfl E F. 1997. Petrogenesis of giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite. *J. Petrol.*, 38: 1419~1458.
- Ptash C L, Mathez E A. 1996. Constraints in the formation of platinum-group element deposits in igneous rocks. *Econ. Geol.*, 91, 439~450.
- Ramdohr P U. 1950. Josephinite, Awaruit, Souesit, iher Eigenschaften, Entstehung und Paragenesis. *Min. Mag.*, 12: 374.
- Rudashevsky N S, Dmitrenko G G, Mochalov A G, Menshikov Y P. 1983. Native metals and carbides in alpine-type ultramafites of Koryak Highland. *Mineral. Zh.*, 9(4): 71~82 (in Russ).
- Rudashevsky N S, Mochalov A G, Budko I A, Shumskaya N I. 1988. Pt-Ir-bearing and Ir-Pt-bearing taenite and Fe-bearing iridosmine—New mineral species. *Mineral Zh.*, 10(1): 15~22 (in Russ).
- Stockman H W, Heava P F. 1984. Platinum-group minerals in Alpine chromitites from south western Oregon. *Econ. Geol.*, 79: 491~508.
- Thayer T P. 1964. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Guleman-Soridag district. *Turkey. Econ. Geol.*, 59: 1497~1524.
- Zhou M F, Bai W J. 1992. Chromite deposits in China and their origin. *Mineral Deposits*, 192~199.
- Zhou M F. 1995. Petrogenesis of the podiform chromitites in the Luobusa ophiolite, Southern Tibet. Unpublished PhD thesis, Dalhousie University.
- Макеев А. В. 1992. Минералогия алвинотипных ультраажитов урала. Санкт-Петербург, Наука, 194.

图版说明

图版 I

1. Ni-Fe-C 合金, 样号1-17, 化学成分见表1(分析点1~6), 显示交生结构。
2. Ni-Fe-C 合金, 样号1-23, 化学成分见表1, 显示交生结构。
3. 显示 Co-C, W-C, W-Ti-C 合金细粒聚集体。
4. Al-Fe-La 系合金, 样号32-12, 化学成分见表3, 分析点1和3以 Al 为主; 4~6以 Al 和 La 为主, 7~9以 Fe 和 Al 为主。

图版 II

1. Fe-Si-Ti 合金。
2. Fe-Ni-C 合金, 显示其组合结构。
3. Ni-Ir-Fe 合金, 化学成分见表7。照片中分析点1和3为 Os-Ru-Fe 合金, 3和4为 Ni-Ir-Fe 合金, 5, 6为自然铁, 7和8为 Ni-Ir-Fe 合金, 显示交生结构。

Chemical Compositions of Alloys from Podiform Chromitites in the Luobusa Ophiolite, Tibet

BAI Wenji, YANG Jingsui, FANG Qingsong, YAN Binggang, ZHANG Zhongming

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract

A group of mantle minerals containing about 70~80 subtypes of minerals have been discovered from podiform chromitites in the Luobusa ophiolite, Tibet, China, in which the alloys attract the attention of geologists. This paper reports the types and compositions of the alloys. The alloys were mostly handpicked from heavy mineral separates of the chromitites, and a few of them can be found in thin sections of chromitites. PGE minerals associated with the alloys in the Luobusa chromitites have been reported by Bai et al. (2000). Some alloy systems are reported in this paper, including the Ni (Fe)-C-Cr, W-Cr-Co; Al-Fe-La; Fe-Si-Ti; Ag-Sn-Si; Ni-Ir-Fe; Fe-Pd-Pt and Fe-Ni-C systems. The alloys in the Luobusa chromitites clearly indicate that they were formed under reducing conditions, but we argue that the chromites may have been formed from boninitic melts and the alloys are xenoliths of crystals to be held up in the mantle during the core formation, or have been transported from the core to lower mantle by a plume, and then incorporated in the chromitites during its crystallization.

Key words: alloy minerals; chromitite; ophiolite; Tibet

