

西藏蛇绿岩的超高压矿物 FeO、Fe、FeSi、Si 和 SiO₂ 组合及其地球动力学意义

白文吉 杨经绥 方青松 颜秉刚 张仲明

(中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037)

摘 要 在西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带的东段, 出露罗布莎蛇绿岩块和豆荚状铬铁矿床。从豆荚状铬铁矿石中查明 60~70 种伴生矿物, 其中包含 FeO、Fe、FeSi、Si 和 SiO₂ 组合。根据超高压-高温实验, 该组合应形成于地球外核与下地幔之间的 D'' 层, 是地球外核的液态铁与镁硅酸盐钙钛矿 (MgSiO₃) 相互化学反应的产物。西藏该超高压矿物组合揭示了蛇绿岩地幔活动可能深达地球外核。罗布莎蛇绿岩的该矿物组合可能是地幔-外地核之间的产物, 或者是被对流作用, 亦或是被起源于 D'' 层的地幔柱活动带到上地幔的。铬铁矿在地幔中结晶, 并捕获了该矿物组合。

关键词 西藏 蛇绿岩 超高压矿物 FeO-Fe-FeSi 和 SiO₂ 组合

Ultra-High Pressure Minerals FeO, Fe, FeSi, Si and SiO₂

Assemblage from Ophiolite in Tibet and Its Earth Dynamic Significance

BAI Wenji YANG Jingsui FANG Qingsong YAN Binggang ZHANG Zhongming

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

Abstract The Luobusa ophiolite and its chromite deposits outcrop in the eastern section of the Yarlung Zangbo River ophiolitic zone. About 60~70 types of associated minerals including FeO, Fe, FeSi, Si and SiO₂ have been found from the podiform chromitite in Tibet. Based on high-pressure and high-temperature experimental data, this mineral assemblage was formed in D'' layer between the outer core and the lower mantle, being a product of chemical reaction between liquid iron of the outer core and magnesian silicate perovskite (MgSiO₃) of the lower mantle. The existence of these high-pressure minerals implies that the deep mantle activity of ophiolite might have affected the Earth's outer core, and that the chemical reaction between the outer core and the lower mantle might have happened. The ultra-high minerals were formed in D'' layer and brought up to the upper mantle by mantle plume generated from D'' layer.

Key words Tibet ophiolite ultra-high pressure mineral FeO, Fe, FeSi, Si and SiO₂ assemblage

在西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带的东端, 出露罗布莎蛇绿岩块, 该蛇绿岩块的地幔橄榄岩内, 发育冶金级豆荚状铬铁矿床 (王恒升等, 1983; 张浩勇等, 1996; 白文吉等, 2000a), 在铬铁矿石中查明大约 60~70 种包裹体和脉石矿物 (白文吉等, 2000b), 包括金刚石、石墨、自然硅、铬、镍、钨、锌、铅、铜、铁、金、铁硅合金、铁-镍合金、硅碳、铁碳、铬碳、铝铁、铌铁、铁镍铬合金, 此外尚有 FeO、MgO、TiO₂、(SiTi)₂O₂、Al₂O₃、SiO₂ 等氧化物和硅酸盐矿物 (白文吉等, 2000, 2001a, 2001b)。

在铬铁矿石中查明了 FeO、Fe、Si₇Fe₃、SiO₂ 组合, 特别是这几种矿物呈连生晶或交生体存在, 更具有形成环境的指示意义。上述矿物组合在蛇绿岩中发现, 实属第一次。根据现代实验, 罗布莎该矿物组合应该是地球外核的液态铁同下地幔镁硅酸盐 (MgSiO₃) 在超高温-超高压下发生化学反应的产物 (Knittle, 1986, 1991)。证明罗布莎以及雅鲁藏布江蛇绿岩的地幔活动可能曾经深达地球外核与下地幔之间的 D'' 带。因而, 西藏蛇绿岩超高压矿物组合不但具有矿物学意义, 而且具有地球动力学重要意义。

1 地质背景

西藏罗布莎蛇绿岩出露于雅鲁藏布江南岸,位于拉萨东南方 200 km 处的罗布莎村一带(图 1),主要由地幔橄榄岩、堆晶纯橄岩、辉石岩、辉长岩杂岩

组成,其上部为蛇纹混杂堆积层。蛇绿岩块南界为断层,将该蛇绿岩的地幔橄榄岩与三叠系复理石分开,北部被第三系罗布莎群和岗底斯花岗岩基复盖,蛇绿岩和二者间为推复逆断层。该蛇绿岩块 EW 向延伸 42 km,出露面积大约 70 km²。

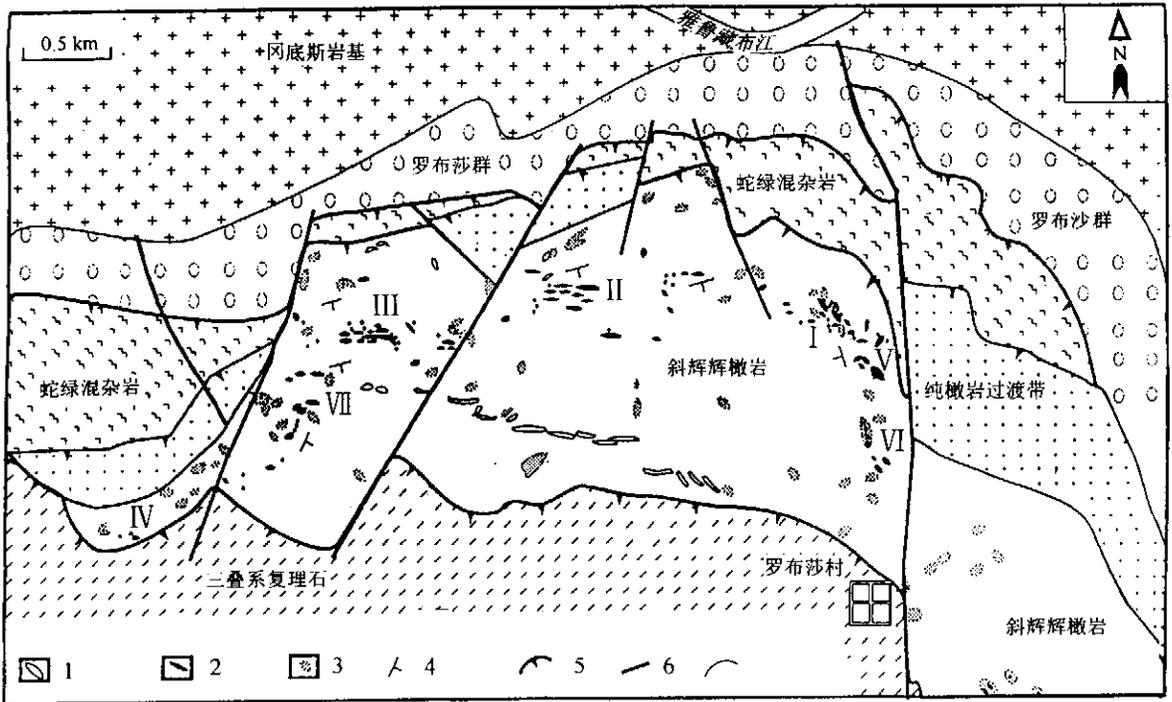


图 1 西藏罗布莎蛇绿岩及铬铁矿床地质略图(据 Zhou,1996;白文吉等,2000)

Fig. 1 Geological map of the Luobusa ophiolite and chromitite deposits (after Zhou 1996; Bai Wenji et al. 2000)

1-辉长岩墙 2-铬铁矿体 3-纯橄岩透镜体 4-叶理的走向和倾向 5-俯冲断层 6-断层 7-不整合

1-gabbro dyke 2-chromite body 3-dunite lens 4-strik and dip of foliation 5-thrust contact 6-fault 7-unconformity

豆荚状铬铁矿体呈透镜状断续分布在地幔橄榄岩相内(图 1)。矿体由块状、豆状、角砾状和浸染状矿石组成。造矿铬尖晶石为高铬铬尖晶石,其 Cr₂O₃ 含量变化于 59%~68%(Hu,1999)。根据罗布莎铬铁矿化学成分,曾被认为是玻安岩熔体同橄榄岩反应的产物(Zhou 等,1996)。

在罗布莎豆荚状铬铁矿矿石中发现不寻常的矿物组合,其中包括金刚石(方青松等,1981)、硅镁尖晶石(白文吉等,2001)、硅金红石(Ti_{0.8}Si_{0.2})O₂^①、八面体蛇纹石假象、八面体绿泥石假象(杨风英等,1981;易隶文,1986;白文吉等,2000)以及高硅斜方辉石[(Mg,Fe,Si)SiO₃](Hu,1999;白文吉等,2001)。

本文报道 FeO、Fe、Fe_xSi_y、SiO₂ 和 Si 组合,并

认为可能是地球外核与下地幔之间发生化学反应的产物(Knittle 等,1991)。

2 矿物分离与实验方法

1996 年,在罗布莎铬矿山开采坑道内取第 2 群 31 号矿体的矿石(块状为主)1 500 kg,经清洗后在原地质矿产部郑州矿产综合利用研究所选矿,结果选取 25 粒细粒金刚石(白文吉等,2001c)。用双目镜在重砂样品中选出包括硅酸盐、氧化物、硫化物、金属合金、自然元素和碳酸盐等 60~70 种矿物。

从铬矿石中挑选出的单晶矿物,被制磨成薄片,用能谱仪和电子探针测定矿物化学成分,一部分矿物在加拿大达霍希(Dalhousie)大学电子探针室利用一台 JEDL 733 型电子探针,工作电压 15 kV,电流 15 mA,每点测定时间为 40 s,用天然矿物标样,分

① 杨经绥,2002. 自然科学研究进展(待刊).

析结果用 Link's ZAF 程序修正完成 ;另一部分矿物分析是在国土资源部矿床地质研究所电子探针实验室使用 JXA8800R 型电子探针 ,工作电压 20 kV ,电流 20 mA(2×10^{-8} A) ,用天然矿物标样 ,结果用 ZAF 修正完成。大多数合金和自然金属在能谱仪上分析 ,使用一台扫描电镜(S-3500N)加一台 INCA 能谱分析仪(北京矿山研究总院电子探针室) ,工作电压 20 kV ,时间 10 s ,用 Co 和天然矿物和纯金属做标样。

3 FeO 与 Fe 连晶

3.1 Fe

在罗布莎铬铁矿石中粒状 FeO 和 Fe 比较常见。但是 FeO 和 Fe 呈连晶状态产出实属罕见。FeO-Fe 连晶尺寸只有 200 μ m 左右。Fe 呈浑圆的液滴状位于连晶中央部位 ,外部被 FeO 环绕 ,二者界线十分清晰 ,无交代或扩散现象。在反光镜下 ,圆珠状 Fe 为白色 ,FeO 略具浅黄色(图 2)。Fe 和 FeO 的化学成分如表 1、表 2。在坦桑尼亚(Tanzania)金伯利岩金刚石中自然 Fe 和 FeO 也呈连晶出现 ,在颗粒中央部位为圆珠状 Fe ,并被 FeO 环围绕 ,二者界线十分清晰 ,颗粒直径 80 μ m ,中央 Fe 相较明亮 ,而边缘 FeO 较暗淡 ,这种结构完全与西藏罗布莎的 Fe-FeO 连晶相同(Stachel 等 ,1998)。

自然 Fe 也曾 在雅库特(Yakutia)金伯利岩的金刚石(Sobolev 等 ,1981)和 Sloan 金伯利岩金刚石中发现过(Meyer 等 ,1986)。

西藏罗布莎自然 Fe 的化学成分特点是含有较高 MnO。圆珠状自然 Fe 颗粒的出现 ,表明地幔中 Fe 曾为液态 ,这与液态 Fe 组成地球的外核的推论

表 1 罗布莎的 Fe 与金伯利岩金刚石中 Fe 的化学成分
Table 1 Chemical composition of Fe from the Luobusa and diamonds from kimberlites %

元素	1	2	3	4	5	6	7	8
Fe	98.40	98.30	100.70	98.90	98.08	97.73	98.95	96.89
Co	0.10	—	—	—	—	—	—	—
Ni	0.11	0.11	0.00	—	—	—	—	0.12
Cu	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr	—	0.48	0.66	—	—	—	—	—
Mn	0.04	—	0.37	0.91	0.54	0.65	0.55	2.64
Si	—	—	—	0.91	0.03	—	0.50	—
Al	—	—	—	—	1.35	—	—	0.15
总计	98.70	99.10	101.70	100.00	100.00	100.00	100.00	99.92

注 :1-和平金伯利岩筒 ,西伯利亚(Sobolev 等 ,1981) ;2-埃克哈尓(Aikhal)金伯利岩 ,西伯利亚 ,同上 ;3-斯劳安(Sloan)金伯利岩 ,美国 Colorado(Meyer 等 ,1986) ;4~8-罗布莎铬铁矿中的 Fe :4-为 核心部位圆珠状 Fe(JXA8800R 电子探针分析) ;5~7-为 INCA 能谱仪分析 ,分析结果换算成 100。

表 2 西藏罗布莎铬铁矿中方铁矿与坦桑尼亚方铁矿化学成分对比

Table 2 Chemical composition of wüstite from the Luobusa and Tanzania %

元素	坦桑尼亚	罗布莎 Luobusa
P ₂ O ₅	≤0.02	—
SiO ₂	0.83	1.95
TiO ₂	≤0.01	0.17
Al ₂ O ₃	0.12	0.17
Cr ₂ O ₃	1.74	—
FeO	94.98	93.00
MnO	≤0.78	0.32
NiO	≤0.02	—
MgO	≤0.02	7.26
CaO	≤0.01	—
K ₂ O	≤0.02	—
Na ₂ O	≥0.01	—
总计	98.46	100.92

注 :罗布莎样品用 JXA8800R 型电子探针分析 ;坦桑尼亚样品见 Stachel 等 ,1998。自然铁经 X-射线衍射分析为 α -Fe ,空间群 Fm3m ,晶胞参数 $a = 2.8664$;方铁矿空间群 Fm3m ,晶胞参数 $a = 4.307$ [中国地质大学(北京) X-射线衍射分析室]。

相一致。可能少量液态 Fe 曾由外核转入地幔内 ,在固化时保留了液态圆珠状的外形。

3.2 FeO

在罗布莎铬铁矿中出现 FeO ,并且有时与 Fe 呈连晶产出 ,FeO 呈不对称环状包围自然 Fe ,FeO 本身亦呈浑圆外形。图 2 表明 Fe 和 FeO 二者都曾呈液态存在过。

在坦桑尼亚金伯利岩金刚石中的 FeO 与罗布莎相似 ,均呈浑圆的外形 ,并包围自然 Fe 的浑圆核心(Stachel 等 ,1998)。在非洲津巴布韦(Kopylova 等 ,1997) ,北美 Colorado-Wyoming(Otter 等 ,

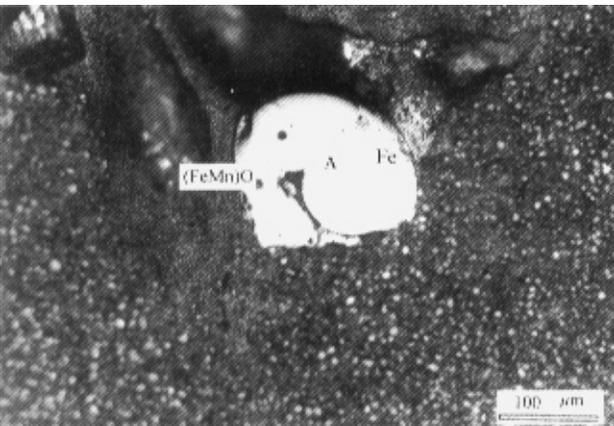


图 2 罗布莎铬铁矿中的 Fe-FeO 连晶显微照片

Fig. 2 Microphotograph of crystal stock of FeO and Fe from the Luobusa chromitites

反光镜下 ,圆形 A 是 Fe ,B-Fe ,C(FeMn) cabochon ,D 是 native Fe ,E(FeMn) B-native Fe

1989), Sloan(Meyer 等, 1986), 非洲莱索托(Mc-Dade 等, 1996)等地的金刚石中都见到方铁矿和铁方铁矿。罗布莎的方铁矿含有较高的 Mn(表 2)。

4 Si-Fe₃Si₇ 连生体

4.1 自然 Si

自然 Si 同 Fe₃Si₇ 的连生晶粒(图 3)表明, Si 与 Fe₃Si₇ 之间的生成联系。从罗布莎铬铁矿石中分离出的自然 Si 有 3 种产状, 即: 呈包裹体分布于 SiC(碳硅石)中; 与 Fe₃Si₇ 呈连体晶粒; 以及呈单独粒状晶体出现。无论呈单晶粒或连生晶体, 罗布莎自然 Si 的化学成分都是单一的, 几乎不含杂质(表 3, 图 3)罗布莎铬铁矿中的自然 Si 颗粒较常见, 粒径多在 100~200 μm。

表 3 罗布莎自然 Si 化学成分

Table 3 Chemical composition of native si from the Luobusha

序号	颗粒号	Si	Fe	误差	注
1	38-28	99.89	0.00	0.28	—
2	38-34	100.00	—	0.29	—
3	34-31	100.00	—	0.42	—
4	4-6	100.00	—	0.34	—
5	31-210	100.00	—	0.27	大于同一粒
6	32-3-93	100.00	—	0.29	—
7	32-3-94	100.00	—	0.32	—
8	38-2A	100.00	—	0.28	与 Fe ₃ Si ₇ 呈连晶者

注: 为 INCA 能谱仪分析, 单位: %。

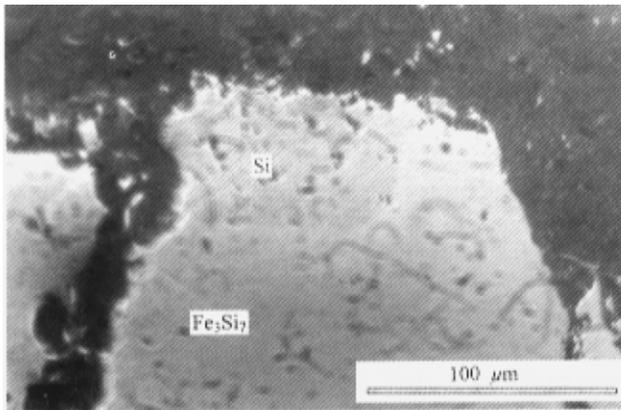


图 3 罗布莎铬铁矿中的自然 Si 与 Fe₃Si₇ 连晶显微相片

Fig. 3 Microphotograph of crystal stock of native silicite (Si) and Fe₃Si₇ from chromitites in the Luobusha

自然 Si 也曾发现于北美 Josephine 岩内, 该岩石分布于 Oregon 的阿尔卑斯(蛇绿岩)型超镁铁岩相内(Bird 等, 1975)。在俄国西伯利亚雅库特金伯利岩金刚石中存在自然 Si(Marshintsev, 1990)。

4.2 Fe₃Si₇

罗布莎的 Fe-Si 合金多呈不规则颗粒, 在双目镜下呈黑色或钢灰色, 光泽很强, 粒径可达 1 mm, 很少保持晶面。罗布莎 FeSi 合金多为 Fe₃Si₇, Fe 含量为 44.3%~45.4%, Si 含量为 55.5%~56.1%, 并含微量的 Au, Sn, Mn, Co 和 Bi 元素。Fe₃Si₇ 合金在 Yakutia 金伯利岩中也存在, 呈包裹体分布在 SiC(碳硅石)内(Mathez 等, 1995)。另外, Fe₃Si₇ 呈细粒状态发现于哈萨克斯坦肯皮尔塞蛇绿岩豆荚状铬铁矿石中(Melcher 等, 1997)。在 Northern Azov 地区还发现了 Si₃Fe₂ 合金在东南 Michigan 的一种超镁铁岩中发现 Fe₃Si₇、Si₂FeTi 和自然 Si(Essene 等, 1986)。上述地点的 Fe₃Si₇ 都缺乏 X-射线衍射数据。

在罗布莎铬铁矿中找到自然硅同 Fe₃Si₇ 合金的连生体(图 3), 表明它们的成因有密切关系。西藏罗布莎和哈萨克斯坦肯皮尔塞铬铁矿含有 Fe₃Si₇。罗布莎 Fe₃Si₇ 的 X-射线衍射分析表明, 为斜方晶系, 可能是一种新矿物。除 Fe₃Si₇ 外, 在罗布莎尚存在 Fe₃Si, Fe₂Si, Fe₂Si₅, Fe₅Si₃ 等, 但 Fe₃Si₇ 更常见。

5 SiO₂-硅酸盐

5.1 SiO₂

在罗布莎铬铁矿石中有较多的 SiO₂ 颗粒, 它们具有短轴状或近等轴状的外形, 晶面发育, 粒径多为 100 μm。在双目镜下观察具强玻璃光泽。部分 SiO₂ 颗粒经 X-射线衍射分析为石英结构。自由 SiO₂ 也存在于金伯利岩中, 如南 Wyoming(McCallum, 1976)。石英与 SiC 呈交生体产出(Leung 等, 1990), 也发现于金伯利岩中。在金伯利岩中曾发现柯石英包裹体赋存在金刚石中(Meyer, 1985), 石英和石榴石共同包含在金刚石中(Stachel 等, 1998)。罗布莎铬铁矿中 SiO₂ 的化学成分极单纯, 经电子探针分析表明, 只含 P₂O₅ 杂质 0.15%~0.23%。除在人工重砂中找到 SiO₂ 外, 还在 Os-Ir 合金、Fe-Ni 合金中找到了 SiO₂ 颗粒。SiO₂ 颗粒呈浑圆的圆珠状分布在 Os-Ir 合金内(图 4-b, 黑色圆形点 6 号及未加号码者均经能谱分析为 SiO₂)。除单粒圆珠状 SiO₂ 外, 还有 SiO₂ 与硅酸盐呈不混溶球状体(图 4-b, 其中 1、2 号为 SiO₂, 3、4 号分析为硅酸盐)。图 4 上部的不混溶球体的放大照相为图 4-a。图 4-a 反映出 2 种矿物界线隐约可见, 但不十分清晰, 左半球化学成分为 SiO₂, 右半球为硅酸盐。表明在蛇绿岩铬铁矿中确实存在自由 SiO₂, 而且曾呈液态出现,

并被地幔中的 Os-Ir 合金捕获。

5.2 硅酸盐

一种成分特殊的硅酸盐呈浑圆状球体被包裹在 Os-Ir 合金中(图 4),并且与自由 SiO₂ 呈不混溶状态存在,说明该硅酸盐曾呈液态并且 SiO₂ 已经饱和。该硅酸盐 SiO₂ 的质量分数大约为 50%~53%, MgO 为 13%~17%, Al₂O₃ 为 11%, CaO 为 9%~10% (表 4)。

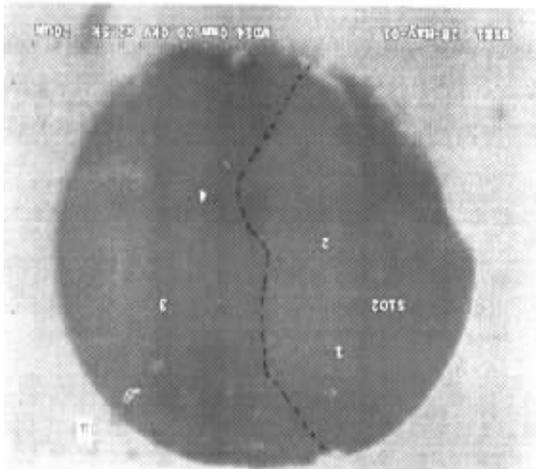
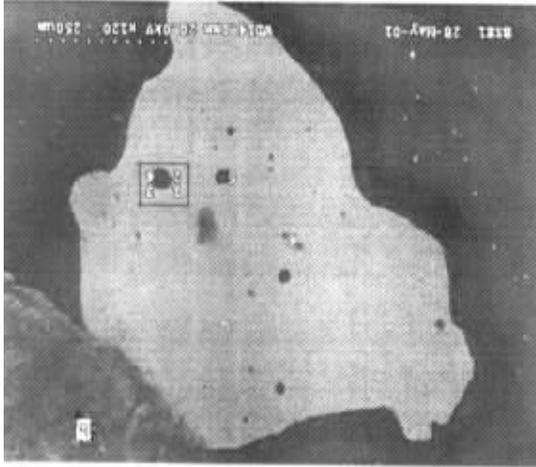


图 4 西藏铬铁矿中的 Os-Ir 合金含有 SiO₂ 和硅酸盐球状包体显微相片

Fig. 4 Microphotograph of globular SiO₂ and SiO₂-silicates in Os-Ir alloy as an inclusion in chromite in the Luobusa analysed point 1 and 2 are SiO₂ 3 and 4 are silicates; a is extended for b

包裹体硅酸盐类似于辉石,但比单斜辉石的 CaO 低,而 Al₂O₃ 含量较高。按辉石计算它们的平均分子式为 (Mg_{0.82} Ca_{0.38} Fe_{0.32} Ni_{0.04} Al_{0.33})_{1.89} (Si_{1.86} Al_{0.14})_{2.00} O₆。表明大量的 Al 与其他二价阳离子共同占据配位的八面体位置,因而是高压条

表 4 罗布莎铬铁矿中 SiO₂ 和硅酸盐化学成分

Table 4 Chemical composition of free-SiO₂ and silicate

from chromite in the Luobusa						%
元素	A-1	A-2	B-6	A-3	A-4	B-5
MgO	—	—	—	16.05	17.00	13.33
Al ₂ O ₃	—	—	—	11.33	11.02	11.09
CaO	—	—	—	10.19	10.45	9.03
FeO	8.54	—	—	8.57	14.34	—
Na ₂ O	—	—	—	—	—	1.90
SiO ₂	100.00	100.00	100.00	53.901	52.96	50.32
总计	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

注:该表内化学成分是用 INCA 能谱仪测定,样品号码同图 5。

按辉石分子式计算结果:A-3(Mg_{0.85} Ca_{0.38} Fe_{0.26} Al_{0.37})(Si_{1.90} Al_{0.10})O₆;A4(Mg_{0.90} Ca_{0.40} Fe_{0.26} Al_{0.34})(Si_{1.88} Al_{0.12})O₆;B5(Mg_{0.73} Ca_{0.35} Fe_{0.44} Na_{0.14} Al_{0.28})(Si_{1.80} Al_{0.20})O₆,推测该矿物可能原具钙钛矿结构,待今后详测。

件下的产物,很可能为硅酸盐钙钛矿(目前因其粒度小缺少结构资料)。与硅酸盐不混溶共生的自由 SiO₂,可能与硅酸盐相同,是超高压矿物(斯石英)或其相变物。罗布莎铬铁矿中的包体又给超高压矿物研究提供了有利机会。

6 FeO-SiO₂ 交生体

从罗布莎铬铁矿石的人工重砂中,分离出一粒完好的 FeO-SiO₂ 成分的交生体(图 4)。该交生体晶粒宽约 100 μm 具长柱状体假象,该假象更像辉石或钙钛矿,而不像尖晶石。在反射镜下观察,反射强的部分为 FeO,反射弱的部分为 SiO₂。经 INCA 能谱仪分析,2 种矿物化学成分如表 5。

表 5 罗布莎铬铁矿中 FeO 和 SiO₂ 交生体的化学成分

Table 5 Chemical composition of FeO and SiO₂ from

chromite in the Luobusa							%
元素	1	2	3	4	5	6	7
FeO	5.64	1.21	2.83	—	—	97.63	99.33
TiO ₂	—	—	—	—	—	2.37	0.30
CaO	—	—	—	—	—	—	—
MgO	—	—	—	—	—	—	—
SiO ₂	94.36	98.79	97.17	100.00	100.00	—	—
总计	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

注:序号同图(3-2-2);分析仪器为 INCA 能谱仪;1~5-SiO₂; 6~7-FeO。

交生体的周边是由 FeO 薄层环绕,在分析点 7 和分析点 6(图 5)处呈面积分布,目估 SiO₂ 和 FeO 所占面积相似,因而交生体混合物化学成分可能类似于辉石或钙钛矿,而不类似于橄榄石或尖晶石。

实验证明,由 FeSiO₄ 转变成 SiO₂ + FeO 等化学物,需要在 20 GPa 和 1500 °C 条件下完成(Ming

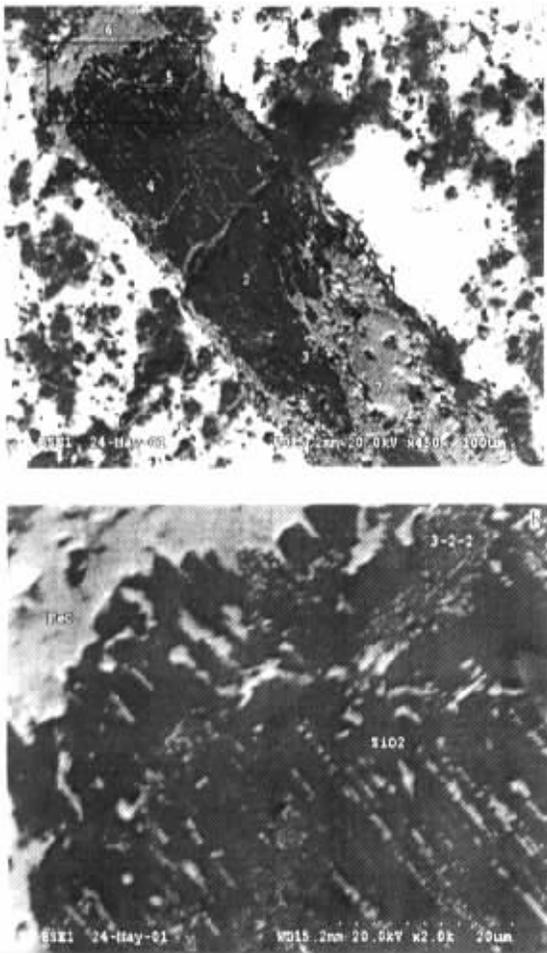


图5 西藏罗布莎铬铁矿中 SiO_2 -FeO 交生体及交生结构

Fig. 5 Microphotograph of structure for SiO_2 -FeO intergrowth from chromitite in the Luobusa
明亮部分为 FeO, 黑暗部分为 SiO_2 , b 为 a 的局部放大,
交生体假象为柱状体

b is extended by a, the columnar pseudomorph of intergrowth is shown

等, 1975)。是由下地幔铁硅酸盐钙钛矿 (Pv-Fe-SiO_3) 退化转变的产物, 还是由铁硅酸盐尖晶石 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{SiO}_4$) 退化转变的产物? 目估 SiO_2 和 FeO 所占面积 (含量) 大体相等且具有长柱状假象。该交生体混合物的化学成分可能相似于 FeSiO_3 。且 SiO_2 和 FeO 交生体为首次在西藏罗布莎发现 (Bai 等, 2001d)。实验证明, 该交生体形成于约 600 km 深部, 这意味罗布莎蛇绿岩的形成深度达到下地幔。

根据蛇绿岩生成于大洋扩张中脊的增生板块边界, 理应推断深部地幔矿物 FeSiO_3 钙钛矿上涌到 600 km 左右深部发生退化相转变形成该交生结构和由其组成的长柱状体假象。

7 讨论

在探索地球深部物质成分和结构方面, 人们做了大量工作, 包括人工合成实验、在金伯利岩金刚石中寻找超高压矿物包裹体等, 已知大多数金刚石包裹体矿物组合主要来源于上地幔的橄榄岩和榴辉岩, 因而它们只提供了 150~200 km 深处的温度和压力记录 (Sobolev, 1977; Meyer 等, 1972; Boyd 等, 1985; Irifune 等, 1986, 1989)。只有少数金刚石包裹体, 如南非、巴西的金刚石含有 Majorite 成分的石榴石 (现在为镁铝榴石加出溶辉石), 被认为是深地幔条件下的产物 (Moore 等, 1985; Haggerty, 1991; Moore 等, 1991)。在南澳大利亚的 Orrorroo 金伯利岩金刚石中发现立方-八面体顽火辉石 (En_{94}) 以及镁方铁矿; 在南非的 Koffiefontein 金伯利岩金刚石中也发现镁方铁矿; 美国 Colorado 的 Sloan 金刚石中也赋存于镁方铁矿包体 (Meyer 等, 1986; Otter 等, 1989)。在 Koffiefontein 的 1 粒金刚石中含有镁方铁矿和顽火辉石 (En_{95}) 2 粒不相连的独立矿物, 均被认为是下地幔的产物 (Gurney 等, 1986)。实验证明, 镁方铁矿 (Mg, FeO) 和 (Mg, Fe) SiO_3 钙钛矿为下地幔的稳定相, 是在下地幔 (650 km 以下) 形成的 (Scott 等, 1984; Ringwood, 1975; Liu, 1975)。现代高温高压实验证明, 在地球的地核-地幔边界的条件 (140 GPa) 下, 地球外核的液态 Fe 与下地幔 (Mg, Fe) SiO_3 钙钛矿发生化学反应, 产生合金 (FeO 和 FeSi) 以及非金属硅酸盐 (Mg, Fe) SiO_3 钙钛矿和 SiO_2 相应相, 但 FeSi 合金的 Fe/Si 比值是不确定的, 为 Fe_xSi_y (Knittle 等, 1991)。核-幔边界的 D' 层可能是这种化学反应的产物, 该化学反应平衡式: $\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x}\text{SiO}_3 + 3[(1-x)-s]\text{Fe} = x\text{MgSiO}_3 + s\text{SiO}_2 + [3(1-x)-2s]\text{FeO} + [(1-x)-s]\text{FeSi}$, 这里 x 为硅酸盐钙钛矿的 Mg 份数; s 是反应生成石英 (SiO_2) 相关相的模式含量。由于在实验中见到 SiO_2 相和 FeSi 合金, 所以, $0 \leq s \leq 1-x$ (Knittle 等, 1991)。根据实验, 地球的核-幔边界应该产生液态 Fe 和 (Mg, Fe) SiO_3 的反应物: FeSi、FeO、 SiO_2 、Fe 和 MgSiO_3 等相应的相。而这些矿物相几乎都在金刚石中发现过, 由此推断, 形成金伯利岩的热源必然可深达 670 km 以下的下地幔, 极可能是来自 D' 层核-幔边界 (Haggerty, 1994)。

罗布莎蛇绿岩铬铁矿中上述矿物组合, 在化学成分上都与高温高压的反应实验结果相吻合, 表明罗布莎蛇绿岩的地幔活动深度可能达到核-幔边界。

因为蛇绿岩(古大洋壳与上地幔)主要生成于大洋板块的扩张中脊或增生区以及对流上升区,所以热源和动力都来自于深部。超金伯利作用(Haggerty, 1994)或超地幔柱作用可能深达地核-地幔之间 D'层。起源于核-幔边界的超地幔柱在上升途中容纳了不同层次(超高压)矿物,并保护了极少量超高压矿物到上地幔浅部。金伯利岩金刚石中包体、罗布莎铬铁矿包体和核-幔边界条件的实验生成物:FeSi、FeO、SiO₂、Fe 和 MgSiO₃ 等的相似性表明,它们可能具有相似的温度-压力生成条件。因而综合论述这一矿物组合是有重要意义的。

金伯利岩为大陆地幔岩浆作用产物,蛇绿岩是古大洋地幔岩浆作用产物,二者在大地构造上的作用不同。但是在核-幔边界深度上的热-动力源泉可能是同一的,超高压矿物组合的大部分是相同的。形成蛇绿岩(古大洋壳幔)和金伯利岩的热-动力起源于核-幔边界的化学反应,超地幔柱由核幔边界上升到上地幔甚至地壳,完全可能是地壳动力的主要力源。核幔化学反应及生成物如图 6。

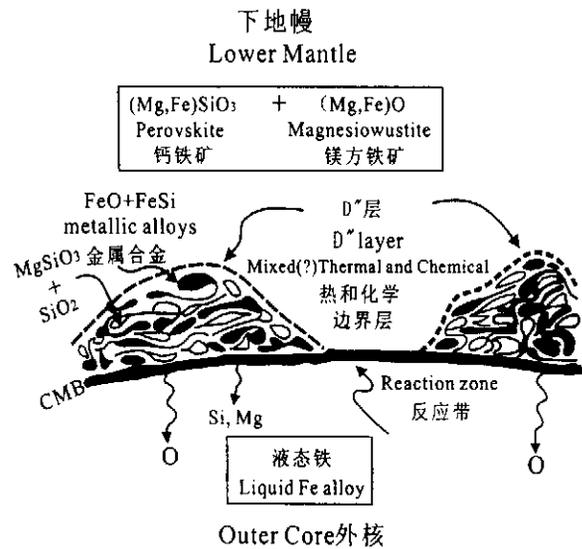


图 6 根据地球物理和实验观测推断的核-幔边界的结构(据 Knittle 等,1991)

Fig. 6 Structure of the core-mantle boundary (CMB) and D' layers as suggested by geophysical and experimental observations (after Knittle et al., 1991)

致谢 西藏泽当罗布莎矿山矿长和西藏第 2 地质队队长对本项研究取样的支持和郑州矿产资源综合利用研究所在选矿工作上的支持,特表感谢。特别应指出本项工作是和加拿大达霍希大学(Dalhousie Univ.) P T Robinson 教授、胡旭峰先生共同合作完成的。

参 考 文 献

方青松,白文吉. 1981. 西藏首次发现金刚石的阿尔卑斯型岩体特征. 地质论评 (5): 455~447.
 王恒升,白文吉,王炳熙,柴耀楚. 1983. 中国铬铁矿及其成因. 北京: 科学出版社, 198.
 白文吉,方青松,张仲明等. 1999. 西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带罗布莎地幔橄辉岩的成因. 岩石矿物学杂志, 18(3): 193~206.
 白文吉,杨经绥,方青松等. 2001a. 地幔内超高压矿物的爆炸. 地球学报 22(5): 385~390.
 白文吉,周美付, P T Robinson, 方青松等. 2000. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿、金刚石及伴生矿物成因. 北京: 地震出版社, 98.
 白文吉,杨经绥,方青松等. 2001b. 寻找超高压矿物的储存库——豆荚状铬铁矿. 地质学前沿 (3): 111~121.
 白文吉,杨经绥, P Robinson, 方青松等. 2001c. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中的金刚石的研究. 地质学报, 75(3): 404~409.
 杨风英,康志勤,刘淑春. 1981. 蛇纹石八面体假象及其成因初步讨论. 矿物学报 (1): 52~54.
 易隶文. 1987. 研究超镁铁岩中八面体假象蛇纹石和绿泥石的地质意义. 岩石矿物学杂志 (4): 374~380.
 张浩勇,巴登珠,郭铁鹰等. 1996. 西藏自治区曲松县罗布莎铬铁矿研究. 拉萨: 西藏人民出版社, 181.

References

Bai Wenji, Paul T. Robinson, Fang Qingsong, Yang Jingsui, Yan Binggang, Zhang Zhongming, Hu Xufeng, Zhou Meifu, John Malpas. 2000a. The PGE and base-metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, southern Tibet. The Canadian Mineralogist, 38: 585~598.
 Bai Wenji, Zhou Meifu, P T Robinson, Fang Qingsong, Zhang Zhongming, Yan Binggang, Hu xufeng, Yang Jingsui. 2000b. Origin of podiform chromitites, diamonds and associated mineral assemblage in the Luobusa ophiolite, Tibet. Beijing: Seismological Press, 98 (in Chinese with English abstract).
 Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, Yan Binggang, Zhang Zhongming. 2001a. Explosion of ultrahigh pressure minerals in the mantle. Acta Geoscientia Sinica, 22(5): 385~390 (in Chinese with English abstract).
 Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, Yan Binggang, Zhang Zhongming. 2001b. Study a storehouse of ultrahigh pressure minerals—podiform chromitite deposits. Earth Scienc Frontiers, 8(3): 111~119 (in Chinese with English abstract).
 Bai Wenji, Yang Jingsui, P Robinson, Fang Qingsong, Zhang Zhongming, Yan Binggang, Hu Xufeng. 2001c. Study of diamonds from chromitites in the Luobusa ophiolite, Tibet. Acta Geologica Sinica, 75(3): 404~409 (in Chinese with English abstract).
 Bai Wenji, Tao Shufeng, Shi Rendeng, Yang Jingsui, Fang Qingsong, Yan Binggang, Zhang Zhongming. 2001d. A new intergrowth consisting of FeO and SiO₂ phases from lower mantle. Continental Dynamics (2): 1~7.
 Bird J M, Weathers M S. 1975. Josephinite: specimens from the Earth's core? Earth and Planetary Science Letters, 28: 51~64.

- Boyd F R ,Gurney J J ,Richardson S H. 1985. Evidence for a 150~200 km thick Archaean lithosphere from diamond inclusion thermobarometry. *Nature* , 315 :387~389.
- Essene E J ,Fisher D C. 1986. Lightning strike fusion : extreme reduction and metasilicate liquid immiscibility. *Science* , 234 : 189 ~ 193.
- Fang Qingsong ,Bai Wenji. 1981. The discovery of Alpine-type diamond-bearing ultrabasic intrusions in Tibet. *Geological Review (Beijing)* 27 : 455~457 (in Chinese with English abstract).
- Gurney J J , Harris J W ,Rickard R S ,Cardoso P. 1986. Mineral inclusions in diamonds from Koffiefontein mine. *Extended Abstracts , the Fourth Int. Kimberlite Conference* :389~391.
- Haggerty S E. 1991. Emplacement and implications of ultradeep xenoliths and diamonds from the transition zone. 5th Inti Kimberlite Conference (Brazil) Abstract : 157~159.
- Haggerty S E. 1994. Superkimberlites : a geodynamic diamond window to the Earth's core. *Earth and Planetary Science Letters* , 122 :57~69.
- Hu Xufeng. 1999. Origin of diamonds in chromitites of the Luobusa ophiolite, southern Tibet, China. Thesis for M. Sc , at Dalhousie University , Halifax , Canada (Unpublished).
- Irifune T ,Hibberson ,Ringwood A E. 1986. Eclogite-garnetite transformation in basaltic and pyrolytic composition at high pressure and high temperature. 4th Int. Kimberlite Conference (Perth) Abstract 16 :259~261.
- Irifune T , Hibberson W D ,Kingwood A E. 1989. Eclogite - garnetite transformation at high pressure and its bearing on the occurrence of garnet inclusions in diamond. In : kimberlite and Related Rocks J. Ross et al. , eds. , Blackwell , Victoria 2 : 877~882.
- Knittle E Jeanloz. 1986. High-pressure metallization of FeO and implication for the Earth 's core. *Geophysical Research Letters* , 13(13) : 1541~1544.
- Knittle E Jeanloz R. 1991. Earth 's core-mantle boundary : results of experiments at high pressures and temperatures. *Science* 25 :1438~1443.
- Kopylova M G ,Gurney J J ,Daniels L R M. 1997. Mineral inclusions in diamonds from the River Ranch kimberlite , Zimbabwe. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 129 : 366~384.
- Leung I S ,Guo W ,Friedman I ,Gleason J. 1990. Natural occurrence of silican carbide in diamondiferous kimberlite from Fuxian. *Nature* , 346 :352~354.
- Liu L. 1975. Post-oxide phases of olivine and pyroxene and mineralogy of the mantle. *Nature* 258 :510~512.
- Mathez E A ,Fogel F A ,Hutcheon I D ,Marshintsev V K. 1995. Garban isotopic composition and origin of SiC from kimberlites of Yakutia , Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 59 :781~791.
- Marshintsev V K. 1990. Nature silicon carbide in Yakutian kimberlites. *Mineral Magazine (3)* :17~26 (in Russian).
- Mc Callum M E. 1976. Diamonds in an upper mantle peridotite nodule from kimberlite in southern Wyoming. *Science* , 192 :253~256.
- Melcher F ,Grum W ,Sion G ,Thalhammer T V ,Stumfl E. 1997. Petrogenesis of a phlogopite-bearing ultrabasic olivine-giant chromite deposit of Kimpirsai , Kazakhstan : Study of solid and fluid inclusions in chromite. *Journal of Petrology* , 38 : 1419~1458.
- Meyer H O A ,Boyd F R. 1972. Composition and origin of crystalline inclusions in nature diamonds. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 36 : 1255~1073.
- Meyer H O A ,Mccallum M E. 1986. Mineral inclusions in diamonds from the Sloan kimberlites , Colorado. *Journal of Geology* , 94 : 600~612.
- Meyer H O A. 1985. Genesis of diamond : a mantle saga. *American Mineralogist* , 70 : 344~355.
- Ming L C ,Bassett W A. 1975. Decomposition of FeSiO₃ into FeO + SiO₂ under very high pressure and high temperature. *Earth and Planetary Science Letters* , 25 :68~70.
- Moore R O ,Gurney J J. 1985. Pyroxene solid solution in garnets included in diamond. *Nature* , 335 :784~789.
- Moore R O , Gurney I J , Griffin W L , Shimizu N. 1991. Ultra-high pressure garnet inclusions in Monastery diamonds : trace element abundance patterns and conditions of origin. *Eur. J. Mineral (3)* : 213~230.
- Otter M L ,Gurney J J. 1989. Mineral inclusions in diamond from the Sloan diatremes ,Colorado-Wyoming State Line kimberlite district , North America. in : Ross , J. et al. (eds) , Kimberlites and Related Rocks. *Geol. Soc. Aust. Spec. Blackwell , Carlton* :2 : 1042 ~ 1053.
- Ringwood A E. 1975. Composition and petrology of the Earth 's mantle. *Mc Graw-Hill , New York*.
- Scott-Smith B H ,Danchin J W ,Harris J W ,Stracke K J. 1984. Kimberlites near Orroroo , South Australia. in : Kornprobst (Editor) , Kimberlites and Related Rocks. *Elsevier , Amsterdam* : 121~141.
- Sobolev N V. 1977. Deep-stated inclusions in kimberlites and the problem of the composition of upper mantle (Translated by American). *Geophysical Union , Washington , D. C*.
- Sobolev N V , Efimova E S , Pospelove L N. 1981. Native iron in Yarkutian diamonds and its paragenesis (in Russian). *Gology-Geophys Adad Nauk SSSR. Sib.* 12 :25~29.
- Stachel T ,Harris J W ,Brey G P. 1998. Rare and unusual mineral inclusions in diamonds from Mwadui , Tanzania. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 132 : 34~47.
- Wang Hengsheng , Bai Wenji , Wang Binxi ,Chai Yiochu. 1983. Chromite deposits of China and its genesis. *Beijing : Science Press (in Chinese)*.
- Yang Fengying , Kang Zhiqin , Liu Shuchun. 1981. A new octahedral pseudomorph of lizardite and its origin. *Acta Mineralogica Sinica* , (1) 52~55 (in Chinese with English abstract).
- Yi Liwen. 1987. Geological significance of studying pseudomorphous octahedral of serpentine and chlorite in the ultramafic rocks. *Acta Petrologica et Mineralogica (4)* 376~380 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haoyong ,Badenzhu ,Guo Tieying et al. . 1996. The study on Luobusa chromite in Qusong County , Tibet. *Lhasa Shi : Tibetan People Publishing House (in Chinese)*.