

# 雅鲁藏布江蛇绿岩中超高压矿物硅尖晶石的研究

白文吉<sup>1</sup> 杨经绥<sup>1</sup> 方青松<sup>1</sup> 任玉峰<sup>1</sup> 戎 合<sup>1</sup>  
施倪承<sup>2</sup> 李国武<sup>2</sup> 马喆生<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学实验室, 北京 100037;

2. 中国地质大学, 北京 100083)

**提要:**从西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带的罗布莎蛇绿岩的铬铁矿中,发现一个由 70~80 种奇异矿物组成的地幔矿物群,其中包括一种成分特殊的尖晶石类矿物。该种尖晶石呈包裹体分布在毒砂中,28 粒该矿物的平均化学成分:Na<sub>2</sub>O 1.58%, MgO 7.52%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 36.59%, SiO<sub>2</sub> 44.45%, FeO 8.72%, 并含少量 CaO 和 TiO<sub>2</sub>。经激光拉曼谱仪测试,一部分颗粒具有 Franclinite(锌铁尖晶石 ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)拉曼谱。根据尖晶石结构和化学成分,可以得出两种分子式:(Mg<sub>0.52</sub> Na<sub>0.14</sub> Fe<sub>0.32</sub> Al<sub>0.74</sub>)<sub>1.72</sub>(Si<sub>2.00</sub> Al<sub>1.20</sub>)<sub>3.20</sub>O<sub>8</sub> 和 (Mg<sub>0.52</sub> Na<sub>0.14</sub> Fe<sub>0.32</sub> Si<sub>0.50</sub>)<sub>1.48</sub>(Si<sub>1.50</sub> Al<sub>1.94</sub>)<sub>3.44</sub>O<sub>8</sub>。两种分子式都表明阳离子 Si 呈六配位占据尖晶石八面体晶格位置。Si 离子呈六配位的硅酸盐,实验证明具有超高压性质,来自相当于过渡带 400~670 km 的深部。表明西藏雅鲁藏布江蛇绿岩(古大洋岩圈)的岩浆活动达到过渡带。可能是地幔柱活动将硅尖晶石类等超高压矿物搬运到上地幔浅部的。

**关键词:**硅尖晶石;蛇绿岩;豆荚状铬铁矿;过渡带;地幔;西藏

**中图分类号:**P574.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)06-1379-07

## 1 概 述

地球的上地幔最丰富的矿物是橄榄石和辉石,在地壳中很容易见到。但是迄今还没有地球过渡带的矿物和矿物组合被发现。过去主要在人工高温高压矿物实验和在金刚石中寻找超高压矿物方面做了大量工作。在南非、巴西的金刚石中发现含 Majorite 成分的石榴石(现为镁铝榴石加出溶辉石),推测为深地幔的产物<sup>[1-3]</sup>。在南澳大利亚的 Orrorroo 金伯利岩金刚石中找到立方-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,在美国 Colorado 的 Sloan 金刚石中也找到方铁矿<sup>[4-5]</sup>。在 Koffiefontein 的一粒金刚石中找到方铁矿和顽火辉石,认为是下地幔的矿物<sup>[6-7]</sup>等等。最近几年笔者将寻找地球深部地幔矿物的目标限定在蛇绿岩豆荚状铬铁矿床上。在西藏勘察出由 70~80 种奇异矿物组成的地幔矿物群<sup>[8-17]</sup>。笔者发现的氧化物组合与某些高温-高压实验结果相吻合<sup>[18-20]</sup>。表明这些氧化物可能来自下地幔深部。氧化物硅尖晶石在化学成分上介于

尖晶石(Mg Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)和 ringwoodite( $\gamma$ -Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)二者之间,但含有六配位 Si,普遍认为具六配位 Si 的硅酸盐矿物形成于过渡带或更深部<sup>[21]</sup>。该矿物表明蛇绿岩的岩浆-构造活动可到达过渡带深度,豆荚状铬铁矿床形成于过渡带,是地幔柱活动将它们携带到上地幔浅部。从矿物独特的化学成分和晶体结构上看,该矿物是一种未定名新矿物,暂称为硅尖晶石。

## 2 地质背景

该尖晶石矿物取自西藏罗布莎铬铁矿石中,呈自形晶包裹体分布在毒砂矿物中。西藏罗布莎铬铁矿床为典型豆荚状矿床<sup>[16, 22]</sup>。含铬铁矿床的罗布莎蛇绿岩块分布于雅鲁藏布江蛇绿岩带的东部曲松县罗布莎村附近。岩块主要由地幔方辉橄榄岩、堆晶岩和蛇纹混杂岩组成。岩块走向呈东西方向,延伸 42 km,南北最大宽 4 km,面积约 70 km<sup>2</sup>(图 1)。

豆荚状铬铁矿体成群分布在方辉橄榄岩相内。矿石储量 500 万 t,主要为块状、豆荚状和浸染状矿石。铬铁矿石的造矿铬尖晶石为富 Cr 类型,Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量达 59%~68%。

收稿日期:2005-11-29;改回日期:2006-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(49972073,40472025)资助。

作者简介:白文吉,男,1935年生,研究员,主要从事基性超基性岩与有关矿产研究。

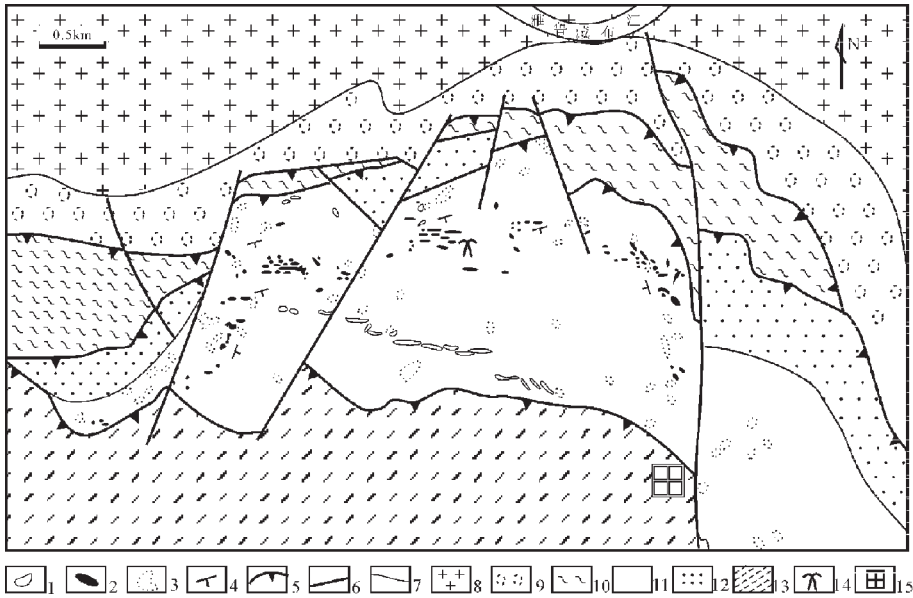


图 1 西藏罗布莎蛇绿岩地质略图

1—辉长岩脉;2—铬铁矿体;3—纯橄橄榄岩透镜体;4—流面产状;5—推覆断层;6—断层;7—不整合;8—花岗岩;  
9—新近系和古近系;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

Fig.1 Geological map of the Luobusa ophiolite, Tibet

1-Gabbro dike;2-Chromitite orebody;3-Dunite lens;4-Strike and dip of foliation;5-Thrust;6-Fault;7-Unconformity;8-Granite;  
9-Neogene and Paleogene;10-Ophiolitic mélangé;11-Harzburgite;12-Cumulate;13-Triassic flysch;14-Mine;15-Luobusa village

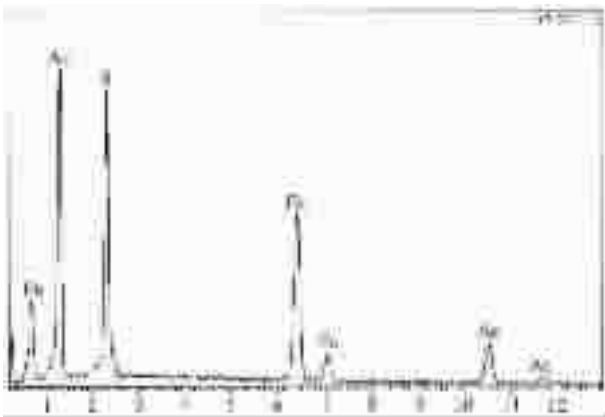


图 2 西藏蛇绿岩地幔岩铬铁矿中毒砂能谱图

Fig.2 Representative energy spectra of arsenopyrite from chromitites in ophiolitic peridotite, Tibet

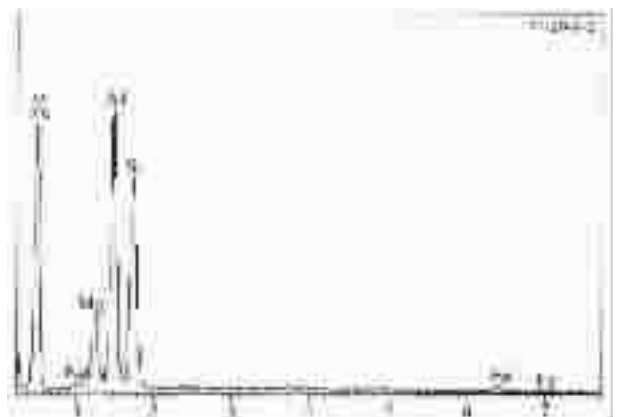


图 3 毒砂中包裹体硅尖晶石能谱图

Fig.3 Reprehensive energy spectra of silicon spinel inclusions in arsenopyrite

毒砂矿物包裹于铬尖晶石或分布于脉石中,它们的粒径多在数百微米或更大,而硅尖晶石粒径都在  $X\mu\text{m}\sim 25\mu\text{m}$ 。

### 3 选矿和分析方法

为了从罗布莎铬铁矿石中选取金刚石和其他伴生矿物,曾在铬矿山 No. 31 号矿体上采集矿石 1500 kg,避免大气污染立刻装袋,运往拉萨实验室,清洗矿石并粉碎成 1 cm 粒

矿块后,用集装箱运到郑州国土资源部矿产综合利用研究所,进行选矿<sup>[9]</sup>。选出的数千克精矿,再在双目镜下挑选金刚石、合金、硫化物、氧化物和硅酸盐矿物等。将选出来的矿物或单矿物聚合物镶嵌在铜台上制成光片。使用日本 HITACHI 公司出产的 S-3500N 型扫描电子显微镜连接英国 OXFORD 公司出产的 INCA 能谱仪,在北京矿山冶金研究总院测定化学成分。测试条件:加速电压 20kV, 电流 15

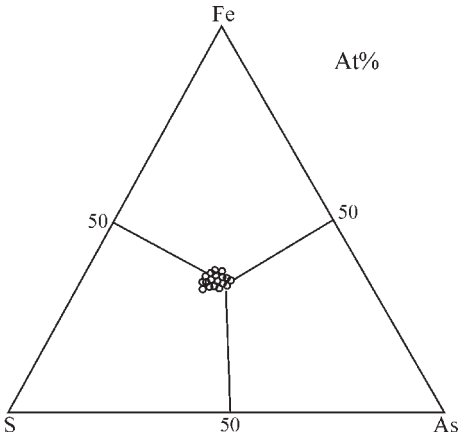


图 4 西藏毒砂化学成分图

Fig.4 Diagram of chemical composition of arsenopyrite from Tibetan ophiolitic chromitites

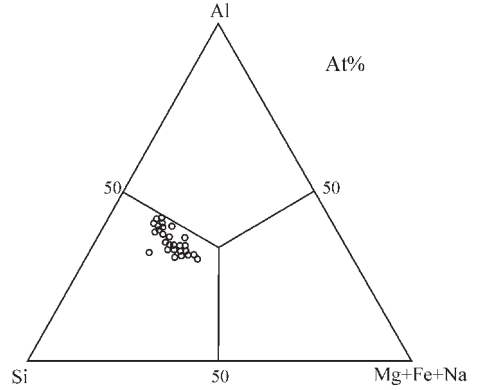


图 5 毒砂中硅尖晶石化学成分图

Fig.5 Diagram of chemical composition of silicon spinel in arsenopyrite from Tibet

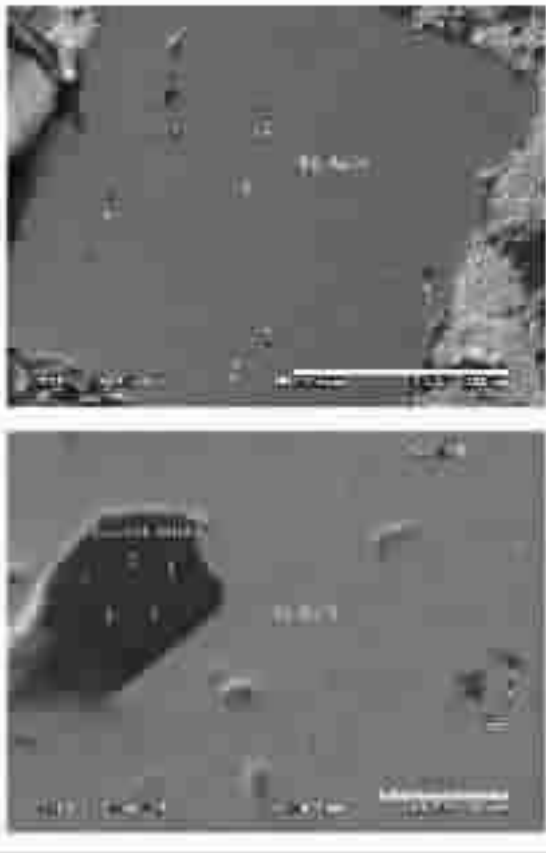


Fig.6 西藏毒砂及其包体硅尖晶石的背散射电子图像

Fe AsS—毒砂; Silicon spinel—硅尖晶石;  
TiO<sub>2</sub> 为金红石包裹体、数字为分析点

Fig.6 ESEI for arsenopyrite and its inclusions silicon spinel in Tibet  
Fe AsS—Arsenopyrite; TiO<sub>2</sub>—Rutile inclusion; number—Analyzed point

表 1 西藏含硅尖晶石的毒砂的化学成分/%

Table 1 Chemical composition (%) of arsenopyrite containing Si spinel in Tibet

样品号	S	Fe	As	S	Fe	As
97-5-1	22.51	36.79	40.70	36.87	34.60	28.53
97-5-2	24.12	35.68	40.20	39.03	33.14	27.83
96-23-1	20.57	37.31	42.12	34.27	35.69	30.03
96-13-1	22.80	37.52	39.86	37.18	35.13	27.69
96-15-1	20.22	36.20	43.49	33.89	34.92	31.19
96-12-1	22.38	37.19	40.43	36.67	34.99	28.35
96-4-1	22.18	35.81	42.00	36.53	33.86	29.60
96-3-1	20.68	37.10	42.22	34.44	35.47	30.09
96-2-1	20.27	38.91	40.82	33.75	37.18	29.08
97-20-3	20.64	38.38	40.99	34.25	36.59	29.13
97-20-2	22.38	39.14	38.48	36.50	36.65	26.85
97-20-1	22.35	38.12	39.35	36.55	35.78	27.67
97-21-1	19.82	37.78	42.40	33.22	36.36	30.41
107-18-1	22.37	37.00	40.62	36.67	34.83	28.50
107-1-1	22.19	37.31	40.50	36.41	35.15	28.44
106-28-1	21.09	38.27	40.65	34.88	36.35	28.77
102-39-1	23.05	38.88	38.07	37.38	36.20	26.42
102-26-1	21.56	39.52	38.92	35.40	37.25	27.35
101-12-1	21.93	38.20	39.87	36.10	36.00	28.00
101-9-B	20.93	37.82	41.25	34.71	36.01	29.28
Mean	21.68	37.64	40.65	35.73	35.60	28.65

将分析结果归 100%。每个样品都带有能谱图和背散射电子图像。

使用的激光 Raman 光谱仪是英国 RENISHAW 公司出产的 RM1000 型。工作条件:波长 514 nm,光栅 1800 I,狭缝 50,物镜 50X,摄谱时间 10~30 s。用 RENISHAW 公司提供的谱库进行比较确定矿物种类。Raman 谱测定是在国土资源部大陆动力学重点实验室完成的(测定人阎玲)。

#### 4 主矿物毒砂的化学成分

毒砂是从铬铁矿人工重砂中选出的。罗布莎毒砂为浅黄

nA, 角度 35°, 时间 30~50 s, 工作距离 15 mm, 分析使用 Sw9100NOST 多元素标样程序以及纯金属、天然矿物标样,

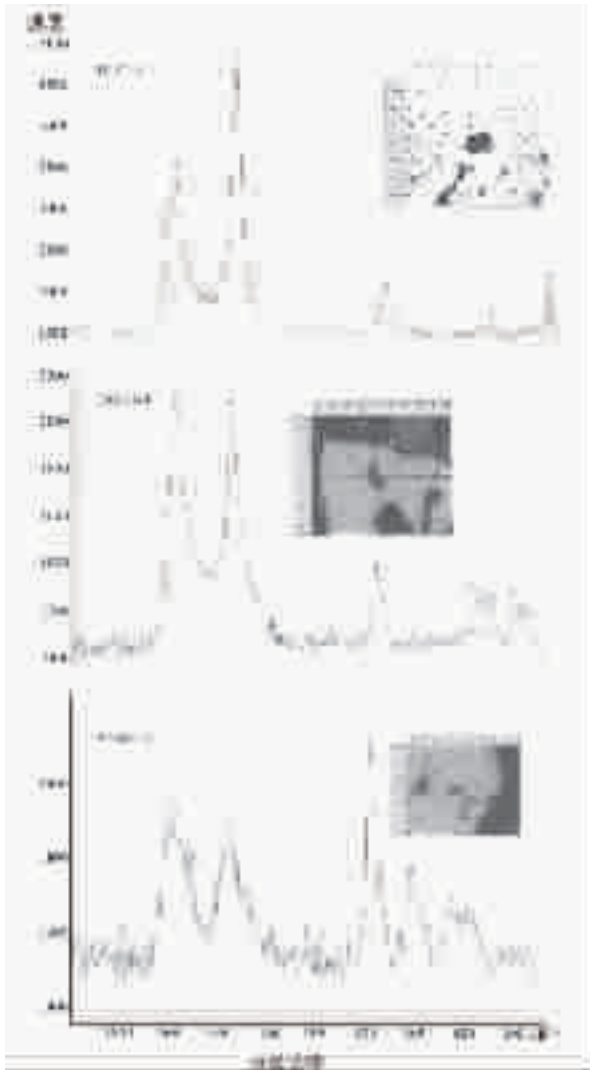


图7 西藏硅尖晶石的 Raman 谱线

Fig.7 Raman spectra of silicon spinel from Luobusha, Tibet

色具金属光泽的柱状晶体。毒砂的化学成分非常单纯,除 Fe、S 和 As 元素外,几乎不含杂质(图 2),其平均分子百分数:S 35.73%, Fe 35.60%, As 28.65%。该毒砂分子式:Fe<sub>35</sub>(S<sub>36</sub>As<sub>29</sub>)<sub>65</sub>, 硅尖晶石均分布在主矿物毒砂中(表 1,图 3)。

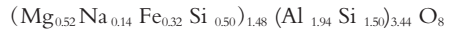
罗布莎铬铁矿石中的毒砂是来自地幔的毒砂,在 Fe-S-As 三组分图上,毒砂投点均集中于该图的中央部位(图 4),毒砂中的硅尖晶石在 Al-Si-Mg+Fe+Na 图解中投点均落在左下方区域(图 5)。

### 5 硅尖晶石的化学成分

从毒砂中发现 28 颗粒硅尖晶石,在光片中它们多呈六边形自形晶,粒径在 Xμm~20 μm,分布在大粒的毒砂中(图 6-a)。硅尖晶石反射率远远低于毒砂,二者界线分明,它的形成早于毒砂(图 6-b)。

硅尖晶石具有独特的化学成分,含较高的 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和较低的 MgO、FeO 和 Na<sub>2</sub>O;平均化学成分:Na<sub>2</sub>O 1.58%、MgO 7.52%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 36.59%、SiO<sub>2</sub> 44.45%、FeO 8.74%。硅尖晶石的化学成分变化范围:Na<sub>2</sub>O 0~3.32%、MgO 4.51%~12.23%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 31.8%~52.65%、SiO<sub>2</sub> 40.50%~46.33%、FeO 2.33%~17.63%,(表 2,图 5)。

在 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(MgO+FeO)三组分图上(图 5),硅尖晶石的投点比较集中,化学成分变动较小。根据化学成分的平均值计算出硅尖晶石两种略有区别的分子式:



两种分子式表明存在两种可能性,按着尖晶石晶体结构和晶体化学,该尖晶石四面体晶格内 1 价和 2 价阳离子不足,势必要由 3 价 Al 或 4 价 Si 阳离子来补充,补充后剩余 Al 和 Si 阳离子占据八面体晶格位置。因此该尖晶石分子式有两种表达方式,然而两种分子式都存在八面体六配位(SiO<sub>6</sub>)硅,六配位硅是超高压硅酸盐矿物的特点<sup>[20]</sup>。罗布莎硅尖晶石代表性的能谱图(图 3)表明除 MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> 和 FeO 四组分外几乎不含其他杂质,化学成分独特,主要成分为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub>。

### 6 硅尖晶石的 Raman 谱

对罗布莎硅尖晶石的晶体结构非常重视,曾用 X-射线衍射分析和 Raman 谱分析多个颗粒。由于毒砂中硅尖晶石粒径小(1~25 μm),X-射线单晶衍射分析没有取得良好的成果。但是用 Raman 激光光谱仪勘察出多个硅尖晶石颗粒具有锌铁尖晶石(francinite)Raman 谱(图 7)。罗布莎毒砂中的硅尖晶石的 Raman 位移峰:1584cm<sup>-1</sup>、1361 cm<sup>-1</sup> 为强峰,783 cm<sup>-1</sup> 为中强峰,408 cm<sup>-1</sup>、370 cm<sup>-1</sup> 为弱峰。罗布莎硅尖晶石 Raman 谱与 RENISHAW 谱库中的锌铁尖晶石(ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)完全吻合,因而具尖晶石结构。由于暂时未发现较大粒度的硅尖晶石,缺少 X-射线衍射数据,因而硅尖晶石为暂时未定名矿物。由于其化学成分和结构不同于已知矿物而具有新矿物的研究价值。

### 7 讨论

罗布莎硅尖晶石呈自形晶细小包体分布在毒砂中,无疑它们得到毒砂主矿物的保护。硅尖晶石具有独特的化学成分,以其富 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 为特征,具这种化学成分的矿物前所未见。Raman 谱确定它属于尖晶石类矿物。含 SiO<sub>2</sub> 低的(~13%)硅尖晶石曾被简单报道过<sup>[12-23]</sup>。由于该尖晶石 Si 阳离子具六配位,占据八面体晶格位置,认为是形成于过渡带的超高压矿物<sup>[21]</sup>。罗布莎硅尖晶石与 ringwoodite 在化学成分上不同,前者含较高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,后者含较高的 MgO。罗布莎硅尖晶石可能是 MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 两种端元尖晶石系列的中间物,它揭示出地球过渡带的尖晶石具有复杂的化学成分,所以过渡带不至是由 β-γ Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 组成的。

表 2 西藏铬铁矿中毒砂中的硅尖晶石包体化学成分

Table 2 Chemical composition (%) of silicon spinel inclusions in arsenopyrite from chromitites in Luobusa, Tibet

样号	分析数	化学成分/%							以 8 个氧原子为基础的阳离子数						
		Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	FeO	CaO	TiO <sub>2</sub>	Total	Na	Mg	Al	Si	Fe	Ca
102-16-1	1	2.43	7.11	38.06	45.46	6.04	0.89		99.99	0.21	0.47	2.01	2.03	0.2	0.04
102-6-2	1	2.32	7.50	34.60	44.35	11.24			100.00	0.20	0.51	1.85	2.02	0.38	
101-20-A	1	2.00	4.51	36.11	43.40	13.68			100.00	0.18	0.33	1.94	1.98	0.47	0.03
101-12	1	2.06	6.22	31.80	41.33	16.35	0.54	1.70	100.00	0.19	0.43	1.75	1.93	0.57	
101-9B	2	0.92	8.43	37.11	40.50	10.99	0.91	1.24(Cu)	99.47	0.08	0.58	2.01	1.86	0.38	0.04
101-5B2	1		10.31	39.44	46.11	2.35	1.79		100.00		0.68	2.04	2.03	0.08	0.08
101-5B3	1		9.65	40.27	46.39	2.44	1.25		100.00		0.63	2.08	2.03	0.08	0.06
101-5B4	1		9.08	41.14	45.36	3.06	1.36		100.00		0.60	2.13	1.99	1.10	0.06
101-5B5	1		9.26	41.16	46.53	2.68	0.38		100.00		0.60	2.12	2.03	0.09	0.02
101-5B6	1		9.83	40.06	45.90	2.91	1.71		100.00		0.64	2.08	2.02	0.08	0.08
101-1A	1	1.23	11.94	34.81	45.41	6.61			100.00	0.11	0.80	1.84	2.03	0.22	
106-11-2	1	0.58	7.83	42.37	45.15	4.07			100.00	0.05	0.51	2.19	1.98	0.13	
106-9-2	1	2.49	5.74	33.38	41.42	16.06		0.82	100.00	0.22	0.40	1.83	1.92	0.56	
106-28-2	1	1.86	5.72	33.77	43.39	14.34		0.92	100.00	0.17	0.39	1.83	1.99	0.49	
97-20-1	2	1.40	9.23	39.89	46.25	3.27			100.00	0.12	0.60	2.07	2.08	0.10	
97-20-3	4	2.07	4.89	34.17	43.30	13.75			98.18	0.19	0.35	1.89	2.03	0.54	
97-20-2	6	0.90	9.46	41.19	46.47	2.33			100.35	0.09	0.62	2.07	2.04	0.09	
97-5-2	1		7.30	39.73	42.32	9.42	1.22		100.00		0.49	2.11	1.90	0.32	0.06
96-12	2	1.33	7.39	41.23	45.19	3.60	1.26		100.00	0.11	0.49	2.13	2.01	0.12	0.04
96-13	2	3.32	11.83	35.73	45.60	3.53			100.00	0.29	0.78	1.88	2.03	0.12	
96-23-2	1	2.57	5.44	32.58	41.77	17.63			100.00	0.23	0.38	1.79	1.95	0.62	
96-23-1	1	1.59	12.23	33.45	52.65				100.00	0.13	0.79	1.72	2.28		
96-4	2	2.69	6.70	32.22	42.50	13.69		2.16	99.96	0.24	0.46	1.75	1.96	0.48	
96-15	1	2.90	6.68	36.46	43.07	10.89			100.00	0.26	0.45	1.96	1.96	0.37	
10-12-2	2	2.95	8.80	32.44	44.09	10.00		1.71	98.28	0.26	0.60	1.75	2.01	0.34	
102-30	1	1.96	4.63	32.45	46.34	13.96		0.67	100.00	0.17	0.31	1.74	2.11	0.48	
102-40	1	2.45	5.57	35.18	41.82	14.98			100.00	0.22	0.38	1.91	1.93	0.52	
102-20	1	2.26	6.18	33.61	42.63	15.32			100.00	0.20	0.43	1.83	1.97	0.53	
Mean	28	1.58	7.52	36.59	44.45	8.74			99.85	0.14	0.52	1.94	2.00	0.30	0.02

注:每个样品代表一个包体,平均化学成分的尖晶石分子式为  $(Mg_{0.52}Na_{0.14}Fe_{0.32}Al_{0.74})_{1.72}(Al_{1.20}Si_{2.00})_{3.20}O_8$  或  $(Mg_{0.52}Na_{0.14}Fe_{0.33}Si_{0.5})_{1.48}(Al_{1.94}Si_{1.50})_{3.44}O_8$ 。

形成于过渡带的超高压矿物之所以能保持其原始晶体结构,是由于母矿物毒砂的保护,这样不难用“潜水艇”效应来理解受到保护的矿物。

形成于过渡带的矿物之所以被翻到浅部,用地幔柱岩浆活动可能解释。过渡带岩浆活动将铬铁矿体从过渡带被搬运到地幔浅部是完全可以理解的<sup>[2]</sup>。

致谢:感谢几年来,西藏雅鲁藏布江蛇绿岩铬铁矿中超高压地幔矿物群的研究,曾得到国土资源部中国地质调查局和国家自然科学基金委员会的资助。也感谢与笔者合作过的加拿大达霍希大学的 P. T. Robinson 教授和香港大学周美付教授。

参考文献(References):

[1] Moore K O, Gurney J J. Pyroxene solid solution in garnets included in diamonds [J]. Nature, 1985, 318:553~555.  
 [2] Haggerty S E. Oxide mineralogy of the upper mantle[A]. In:Lindsley DH (ed.). Minerals, Petrology and Magnetic Significance(Reviews in Mineralogy 25)[C]. Washington Dc:Mineralogical Society of America, 1991, 355~416.  
 [3] Moore R O, Gurney J T. Mineral inclusions in diamond from Monastery kimberlite, South Africa[A]. In:Ross J, et al (eds.). Kim-

- berlites and Related Rocks [C]. Geol. Soc. Am. Spec. Publ. 1989, 14 (2):1029~1041.
- [4] Meyer Henry O A, McCallum M E. Mineral inclusions in diamonds from the Sloan kimberlites, Colorado[J]. Journal of Geology, 1986, 94:600~612.
- [5] Otter M L, Gurney J J. Mineral inclusions in diamond from the Sloan diatremes, Colorado-Wyoming State Line kimberlite district, North America [A]. In: Ross J, et al (eds). Kimberlites and Related Rocks [C]. Geol. Soc. Am. A Spec. Pull. 1989, 14 (2):1042~1053.
- [6] Gurney J J, Harris J W, Rickard R S. Mineral associated with diamond from the Koberts Victor Mine [A]. In: Kornprobst J (ed.). Kimberlites. II. The Mantle and Crust-Mantle Relationships [C]. Amsterdam: Elsevier. 1984, 25~32.
- [7] Gurney J J, Harris W, Kickard R S, et al. Premier Mine diamond inclusions [J]. Trans. Geol. Soc. S. Afr, 1985, 88:301~310.
- [8] 白文吉, 方青松, 张仲明, 等. 西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带罗布莎地幔橄辉岩的成因 [J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(3):193~216.  
Bai Wenji, Fang Qingsong, Zhang Zhongming, et al. The genesis of Luobusa mantle peridotites in the Yarlung Zongbo River ophiolite zone, Tibet [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1999, 18 (3):193~216(in Chinese with English abstract).
- [9] 白文吉, 杨经绥, Robinson P T, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中金刚石的研究 [J]. 地质学报, 2001, 75(3):404~409.  
Bai Wenji, Yang Jingsui, P. T. Robinson, et al. Study of diamonds from chromitites in the Luobusa ophiolite, Tibet [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75 (3):404~409(in Chinese with English abstract).
- [10] 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 寻找超高压地幔矿物的储存库—豆荚状铬铁矿 [J]. 地学前缘, 2001, 8(3):111~121.  
Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, et al. Study on a storehouse of ultrahigh pressure minerals—podiform chromitite deposit [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8 (3):111~121 (in Chinese with English abstract).
- [11] 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 西藏蛇绿岩的超高压矿物: FeO、Fe、Fe Si 和 SiO<sub>2</sub> 组合及其地球动力学意义 [J]. 地球学报, 2002, 23(5):395~402.  
Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, et al. Ultra-high pressure minerals: FeO, Fe, FeSi, Si, SiO<sub>2</sub> assemblage from ophiolite in Tibet and its earth dynamic significance [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(5):395~402 (in Chinese with English abstract).
- [12] 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 西藏蛇绿岩中不寻常的地幔矿物群 [J]. 中国地质, 2003, 30(2):144~150.  
Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, et al. An unusual mantle mineral group in ophiolite of Tibet [J]. Geology in China, 2003, 30 (2):144~151(in Chinese with English abstract).
- [13] 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 西藏蛇绿岩地幔中的主要自然金属矿物 [J]. 地学前缘, 2004a, 11(1):179~187.  
Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, et al. Some native metals from ophiolitic chromitites in Tibet [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1):179~187(in Chinese with English abstract).
- [14] 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿中的合金成分 [J]. 地质学报, 2004, 78(5):675~682.  
Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, et al. Chemical compositions of alloys from podiform chromitites in the Luobusa ophiolite, Tibet [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78 (5):675~682 (in Chinese with English abstract).
- [15] 白文吉, 杨经绥, 施倪承, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩地幔岩中首次发现超高压矿物方铁矿和自然铁 [J]. 地质论评, 2004b, 50(2):184~188.  
Bai Wenji, Yang Jingsui, Shi Nicheng, et al. A discovery of ultrahigh pressure minerals—wüstite and native iron from the mantle of ophiolite at Luobusa, Tibet [J]. Geological Review, 2004, 50 (2):184~188(in Chinese with English abstract).
- [16] 白文吉, 周美付, Robinson P T, 等. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿、金刚石及伴生矿物成因 [M]. 北京: 地震出版社, 2000.98.  
Bai Wenji, Zhou Meifu, Robinson P T, et al. Origin of Podiform Chromitites, Diamonds and Associated Mineral Assemblage in the Luobusa Ophiolite, Tibet [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 2000.98(in Chinese with English abstract).
- [17] 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿中发现超高压矿物柯石英 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2004, 9 (6):651~660.  
Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. Coesite discovered from the podiform chromitite in the Luobusa ophiolite, Tibet [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2004, 29 (5):651~660(in Chinese with English abstract).
- [18] Knittle E, Jeanloz R. Earth's core-mantle boundary: Results of experimental at high pressure and temperatures [J]. Science, 1991, 251:1438~1443.
- [19] Kumazama M, Sawamoto H, Ohtani E, et al. Post-spinel phase of forsterite and evolution of the earth's mantle [J]. Nature, 1974, 247:356.
- [20] Ming L L, Bassett W A. Decomposition of FeSiO<sub>3</sub> into FeO+SiO<sub>2</sub> under very high pressure and high temperature [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 25:68~70.
- [21] Hazen R M, Downs R T, Finger L W. Crystal chemistry of ferromagnesian spinel: evidence for Mg-Si disorder [J]. Am. Mineral, 1993, 78:1320~1323.
- [22] Zhou Meifu. Petrogenesis of the Podiform Chromitites in the Luobusa Ophiolite, Southern Tibet [D]. For the degree of doctor of philosophy at Dalhousie University, Canada, 1995.233.
- [23] Paul T, Robinson, Wenji Bai, et al. Ultra-high pressure minerals in the Luobusa Ophiolite, Tibet, and their tectonic implications [A]. Aspects of the Tectonic Evolution of China [C]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 226:247~271.

## Study of the UHP mineral silicon spinel in the Yarlung Zangbo ophiolite

BAI Wen-Ji<sup>1</sup>, YANG Jing-sui<sup>1</sup>, FANG Qing-song<sup>1</sup>, REN Yu-feng<sup>1</sup>, RONG He<sup>1</sup>  
SHI Ni-cheng<sup>2</sup>, LI Guo-wu<sup>2</sup>, MA Zhe-sheng<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** A mantle mineral assemblage consisting of 70–80 unusual varieties of minerals has been found in chromitite of the Luobusa ophiolite in the Yarlung Zangbo ophiolite zone, Tibet. This mineral assemblage includes a spinel-group mineral with a special composition. The mineral occurs as inclusions in arsenopyrite. The average chemical composition for 28 grains of the spinels is as follows: Na<sub>2</sub>O 1.58%, MgO 7.52%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 36.59%, SiO<sub>2</sub> 44.45% and FeO 8.74 (%), with minor CaO and TiO<sub>2</sub>. Laser Raman spectrometry shows that several grains have the Raman spectrum of franclinite (zinc-iron spinel Zn Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). According to the crystal structure and chemical composition, the spinel (francinlite) has two formulas, i.e.: (Mg<sub>0.52</sub> Na<sub>0.14</sub> Fe<sub>0.32</sub> Al<sub>0.74</sub>)<sub>1.72</sub> (Si<sub>2.00</sub> Al<sub>1.20</sub>)<sub>3.20</sub> O<sub>8</sub> and (Mg<sub>0.52</sub> Na<sub>0.14</sub> Fe<sub>0.32</sub> Si<sub>0.50</sub>)<sub>1.48</sub> (Si<sub>1.50</sub> Al<sub>1.94</sub>)<sub>3.44</sub> O<sub>8</sub>. The two formulas both show that the six-coordinated Si cations occupy octahedral sites of the crystal structure of the spinel. Experiments demonstrate that silicate with six-coordinated Si has the UHP nature and should be derived from the 400–670 km depth equivalent to the transition zone of the Earth. This indicates that the magmatism of the Yarlung Zangbo ophiolite (paleo-oceanic lithosphere) may have reached the transition zone. It is possible that the mantle plume might transport UHP minerals such as silicon spinels from the transition zone to the shallow level of the upper mantle.

**Key words:** silicon spinel; ophiolite; podiform chromitite; transition zone; mantle; Tibet

**About the first author:** BAI Wen-ji, male, born in 1935, senior researcher, mainly engages in the study of basic-ultrabasic rocks and their related mineral resources.