

西藏罗布莎铁族元素金属互化物矿物及其成因探讨

施倪承, 李国武, 熊明, 马喆生

(中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 对西藏罗布莎铬铁矿中的铁族元素金属及金属互化物矿物进行了 X 射线衍射测定, 结果显示其归属于镍纹石、自然铁、钴铁矿及铁镍矿 4 种矿物。它们与超高压矿物方铁矿、铂族元素矿物等连生, 形成于深部的高还原环境, 矿物的化学成分与地核十分相近, 故认为它们可能来自于地幔及地核。

关键词: 铁族元素金属及金属互化物矿物; X 射线衍射; 铬铁矿; 西藏

中图分类号: P578.1⁺2; P571

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)05-0443-04

Metallic and intermetallic compounds of Fe group elements from Luobusa, Tebit, and their origin

SHI Ni-cheng, LI Guo-wu, XIONG Ming and MA Zhe-sheng
(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Metallic and intermetallic compounds of Fe group elements from Luobusa ophiolite chromitites were studied by X-ray diffraction (XRD) analysis. The results indicate that they belong to four mineral species. These minerals are intergrown with such minerals as UHP mineral wustite and platinum group minerals. Formed under the strong reduction condition of great depth, these minerals are similar to the earth's core in chemical composition. It is thus held that the iron group minerals might have been derived from the mantle or the core of the earth.

Key words: metallic and intermetallic compounds of Fe group elements; X-ray diffraction; chromite; Tibet

铁族元素金属矿物是指周期表中过渡族元素 Fe、Co、Ni 及地球化学性质与之相近的 Mn、Cr、V、Ti 等元素的单质及其互化物。根据 Strunz 矿物表中的分类, 该族在自然界中已发现的矿物除 Fe、Cr、Ni、Ti 等单质外, 还有如下金属间互化物矿物: 铁钴矿(wairauite)、镍纹石(taenite)、tetraenite、铁纹石(kamacite)、铁镍矿(awaruite)、ferchromide(Cr_3Fe)及 chromferide(Fe_3Cr)等。我国的铁族元素金属矿物研究已有较多报道, 集中反映在《中国矿物志》第三章中, 其中已发现的矿物有: 自然铬(chromium)、自然铁(iron)、铁镍矿(awaruite)、自然镍(nickel)、铁纹石(kamacite)和镍纹石(taenite)(黄蕴慧等, 2000)。

就晶体结构而言, 铁族元素金属矿物及其金属互化物由于其平均原子半径均在 0.126 nm 左右, 该族矿物一般均以刚性等大球的紧密堆积为其结构特征。根据金属学研究, 与铁的单质及互化物有关的铁的晶体结构主要有两种类型: 即 α -Fe 及 γ -Fe。 α -Fe 的形成温度在 906 °C 以下, 906~1401 °C 为形成 γ -Fe 的稳定区域。

我国相关研究表明, 铁纹石及镍纹石毫无例外地全部产

于降落在我国的陨石中。对于自然铁、自然镍及铁镍矿产状报道多种多样, 除部分为河流冲击物外主要以深源包体为主, 共生矿物有方铁矿等地幔矿物。也有报道该类矿物与超基性岩的蚀变产物蛇纹石及绿泥石共生, 因而认为是超基性岩的次生作用形成的。近年来, 关于西藏罗布莎蛇绿岩地幔矿物群中金属及金属互化物矿物的研究取得了一些重要成果(如白文吉等, 2000, 2002, 2003, 2004a, 2004b; 杨经绥等, 2002; 代明泉等, 2003; 熊明等, 2003), 本文在此基础上, 仅就铁族元素金属及金属间化合物矿物研究现状及其在地球深部物质研究中的意义进行探讨。

1 铁族元素金属矿物的化学成分

对西藏罗布莎铬铁矿中的铁族元素金属矿物的化学成分已有详尽论述(白文吉等, 2004a, 2004b)。该区的铁族元素金属互化物矿物常与 Ir-Fe-Ni 等金属互化物共生, 而其单质的自然铁显示了与方铁矿共生的现象。与此同时, 所有单质金属及金属互化物均与铁族元素的碳化物及硅化物共生。与

收稿日期: 2005-07-22; 修订日期: 2005-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40472025)

作者简介: 施倪承(1937-), 男, 教授, 研究方向: X 射线晶体学, E-mail: shinicheng@vip.sina.com。

陨石中的铁纹石和镍纹石比较,该区的铁族元素金属及金属互化物虽然主要成分均以铁、镍为主,但一般均含有一定量的铬,最高的含铬量可达 20.29%,是一种新端员组分的镍纹石。少量颗粒还含有 Co、Mn 和 Cu 等元素。

2 铁族元素金属矿物的晶体结构与晶体化学

文献(白文吉等,2004a)列出了该区铁族元素金属及其互化物的矿物成分,但各样品究竟归属于哪些矿物种属仍需要继续研究。这是因为即使化学成分完全相同的样品可能归属不同的晶体结构类型,如以自然铁为例,成分全部为铁元素的情况下它既可以具 α -Fe 型的晶体结构也可以具 γ -Fe 型晶体结构,两者矿物种属的归属不同。同样值得注意的是即使样品间的化学成分有很大差异,但由于它们可能属于同一固溶体系列,晶体结构相同而可以属于同一矿物种属。为了阐明该区铁族元素金属矿物的种类已进行了大量的 X 射线晶体学研究。此次在中国地质大学 X 射线衍射实验室的 Bruker APEX 衍射仪上,采用旋转法或 Gandolfi 照相法(李国武等,2005)取得了系列样品的粉晶衍射数据。实验条件: MoK α , 45 kV, 30 mA, 曝光时间 100 s。罗布莎铬铁矿中铁族元素金属矿物的 XRD 数据如表 1、2、3 所示。分析结果表明它们的晶体结构类型仅限 α -Fe、 γ -Fe 及铁镍矿 3 种类型。因为铁族元素的原子半径均为 0.12~0.13 nm,易形成刚性球体的等大球密堆积。 α -Fe 及 γ -Fe 实际上是金属铁在不同温度区域的两种多型变体,而铁镍矿(awaruite)乃是 γ -Fe 晶体结构中 Fe、Ni 两种原子分别有序化的结果。

值得注意的是,西藏罗布莎铬铁矿的铁族元素金属及其互化物中含有碳元素的现象十分普遍(白文吉等,2004b),但在大多数情况下上述含碳的铁族元素金属及金属互化物其晶体结构仍属于 γ -Fe 结构。在一定的温度和压力条件下,以镍纹石结构为主的矿物中碳呈间隙型原子进入结构并不影响

表 1 西藏罗布莎铬铁矿中镍纹石类矿物的 XRD 数据

Table 1 XRD data of taenite minerals from Luobusa chromite in Tibet

原编号 1_3 化学式: Ni _{0.45} Cr _{0.25} Fe _{0.26} Fm3m, a = 3.562 Z = 4 镍纹石类		原编号 1_22 化学式: Ni _{0.47} Cr _{0.11} Fe _{0.14} C _{0.26} Fm3m, a = 3.579 Z = 4 镍纹石类		吉林陨石雨 化学式: Ni _{0.48} Fe _{0.54} Fm3m, a = 3.579, Z = 4 镍纹石(黄蕴慧等, 2000)		
d/Å	I/I ₀	d/Å	I/I ₀	d/Å	I/I ₀	hkl
2.057	82	2.083	100	2.085	100	111
1.781	77	1.793	70	1.785	50	200
1.259	62	1.267	20	1.267	40	220
1.074	55	1.079	21	1.083	40	311
1.028	52	0.894	7			400
		0.820	7			331
		0.799	7			420

表 2 西藏罗布莎铬铁矿中自然铁的 XRD 数据

Table 2 XRD data of iron from Luobusa chromite in Tibet

原编号 38_10 化学式: Fe _{0.97} Mn _{0.03} Im3m, a = 2.8659 Z = 2 矿物种: 自然铁		原编号 16_19 化学式: Fe _{0.54} Co _{0.46} Im3m, a = 2.8492 Z = 2 矿物种: 钴铁矿		JCPDS: 6_696, Iron(Fe) Im3m, a = 2.8664 Z = 4 金属铁		
d/Å	I/I ₀	d/Å	I/I ₀	d/Å	I/I ₀	hkl
2.496*	52					
2.172*	80					
2.032	100	2.013	100	2.026 8	100	110
1.532*	47					
1.433	43	1.422	18	1.433 2	20	200
1.317*	39					
1.256*	50					
1.170	35	1.163 2	22	1.170 2	30	211
1.014	37	1.007 1	8	1.013 4	10	220
		0.901 3	6	0.907 4	12	310
		0.823 3	2	0.827 5	6	222
		0.761 9	7			321

注: 带星号的为方铁衍射线。

表 3 西藏罗布莎铬铁矿中铁镍矿的 XRD 数据

Table 3 XRD data of awaruite from Luobusa chromite in Tibet

原编号 23_104 化学分子式: FeNi ₃ Pm3m, a = 3.545, Z = 1 矿物种: 铁镍矿(awaruite)		JCPDS: 38_419, FeNi ₃ Pm3m, a = 3.545, Z = 1 awaruite		
d/Å	I/I ₀	d/Å	I/I ₀	hkl
2.038	100	2.044	100	111
1.766	32	1.772	60	200
1.251	13	1.253	30	220
1.067	13	1.069	40	311
1.022	4	1.023	10	222
0.851 4	2			410
0.812 4	3	0.814	10	331
	2	0.792	10	420

原有的 γ -Fe 结构框架是可能的(施倪承等,2005)。而在通常情况下,铁族元素与碳化物则形成复杂化合物型的金属碳化物结构。属于该类型的本地区已发现桐柏矿及限碳铁矿,并且发现了一种具有新颖晶体结构类型的含 Fe、Cr、Ni 的铁族元素碳化物(施倪承等,2004b)。

3 铁族元素金属及其互化物的成因探讨

(1) 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿的金属及其互化物包括铁族元素金属及其互化物矿物均是用人工重砂方法加以富集并挑选出来的,因此确实存在选矿过程中如何排除和识别人工合成物的污染问题,如矿物分离设备中普遍使用了铸铁和不

同型号钢的产品, 它们的化学成分与铁族元素金属矿物的成分有相似之处。但两者的区别是十分简单明显的。冶金产品中金属产品往往具有十分高的纯度, 而且各金属的含量配比是恒定的, 这些数据可在产品标准中查到。以铁基高温合金为例, 含钴最高的合金产品的牌号为 N_155(陈冠荣, 2001), 其除铁以外的金属成分(质量分数, 下同)为 Co 20%、Cr 21%、Ni 20%, 根本不存在含钴 50% 的产品。而高温钴基合金仅用于永磁材料等特殊领域, 不可能用于普通的矿物分离机械, 因此可以断定本地区发现的铁钴矿(钴、铁含量各 50%) 并非人工合成物, 而只可能是天然产出物。从文献所列出的本地区的铁族元素金属及其互化物的化学成分中可以看到各样品中 Fe、Cr、Ni、Co、Cu、Mn 等元素不仅成分变化幅度大而且在配比上无规律可言, 因此认为它们是一二种钢铁产品的污染物是难以解释的。

(2) 多数学者认为蛇绿岩铬铁矿中的自然金属及其金属互化物矿物是原生的(Stockman & Hlava, 1984; Auge, 1988; Garuti & Zaccarini, 1997; Melcher *et al.*, 1997; Bai *et al.*, 2000), 但也有学者认为它是次生成因的(Chamberlain *et al.*, 1965; Dick, 1974; Melcher *et al.*, 1997)。Dick(1974)还认为蛇绿岩中的一种铁镍合金的分布与蛇纹石化有关。但白文吉等(2004a, 2004b)认为罗布莎铬铁矿中的包裹体矿物, 如铂族金属合金、贱金属合金以及自然元素矿物显然与地幔橄榄岩的蛇纹石化作用无关, 因为罗布莎方辉橄橄岩是完全未蛇纹石化的新鲜岩石。该区的铁族元素金属互化物还经常出现与铂族元素连生现象(白文吉等, 2004b), 这种高熔点的高还原条件也是蛇纹石化不具备的。

(3) 迄今为止, 作为一种不寻常的组合, 在罗布莎蛇绿岩铬铁矿中已发现了 100 余种矿物, 这些矿物的组合虽然不能用现有的成因矿物学中的矿物共生组合理论加以说明, 但应用成因矿物学的基本原理仍能得到有意义的结论。该区最丰富的矿物种属乃是金属及金属间互化物(合金)。如将所有化合价为零的矿物物相作为金属及其互化物, 至少有 70 或 80 余种。从成因矿物学的共生组合规律来看该矿物群体表达了如下信息: 化合价均为零价, 因此是在高还原环境下生成的; 绝大部分矿物具有很高的熔点(1500~3000℃); 这些矿物与其他类型的高压矿物如氧化物、硅酸盐有连生或互为包裹的现象, 如自然铁与方铁(镁)矿连生等(白文吉等, 2004a, 2004b)。另外, 该区已发现的高压矿物也表征了该类组合的形成深度(金刚石, 150~200 km; 硅尖晶石及硅金红石, 500~600 km)(杨经绥等, 2002; 白文吉等, 2004a), 因此这些矿物组合构成的矿物群体是以地球的深部环境为特征的。

(4) 对于罗布莎铬铁矿中的超高压矿物, Robinson 等(2004)曾认为来自下地幔。而对于该区成分为 FeO、Fe、Fe-Si 及 SiO₂ 的方铁矿、自然铁、硅及其互化物组合, 白文吉等(2002)则认为来自核幔边界。该区大量存在的铁族元素金属及互化物在化学成分上与地核物质相似, 它们有否可能来自于地核的 E 层呢? 这就涉及到地核矿物有否可能存在的

问题。笔者曾基于如下事实提出过地核矿物的概念(施倪承等, 2004a): ①现代地球物理学已将地球层圈构造研究得相当清晰。地球由地壳(0~40 km)、地幔(40~2885 km)及地核(2885~6370 km)构成。结合高温高压实验对地球各层圈的化学成分及其晶体结构状态已有共同认识, 即认为地壳由富铝硅酸盐构成, 地幔由铁、镁硅酸盐及其氧化物构成, 而地核部分一致认为是由铁、镍金属物质构成, 其中地核的外核 E 层是由液态的铁、镍金属物质构成(盖保民, 1991)。②由于 E 层物质呈流动状态, 依据 Wilson(1963)提出的地幔热柱理论, 核幔物质上涌至地壳是可能的。③当 E 层物质保持其金属的零价状态上升至浅部时, 可以冷却成晶态物质。因此可以认为地核矿物的存在至少在理论上是成立的。

地幔矿物的研究来自如下两个方面的进展: 一是对地幔深源包体的研究(如金伯利岩)及陨石矿物的研究, 测得了一批具有高压矿物如金刚石、柯石英及斯石英等; 另一方面是模拟地幔高温高压条件的合成实验, 两者结合形成了标准地球模型方案中关于地幔各层圈化学成分及其晶体结构的认识。由于地幔物质主要是由原子半径不相同的 Fe、Mg、Si、O 等元素组成, 相同化学成分的物质随着深度增加会发生晶体结构上的多形相变, 如石墨-金刚石、石英-柯石英-斯石英、橄榄石-橄榄尖晶石等。这就说明, 对于地幔矿物来说表征地幔深度主要依据的是其晶体结构状态。地核物质主要是由铁以及原子半径与铁相近的镍组成, 这种物质最稳定的晶体结构是六方或立方最紧密堆积。这种稳定结构使得其不随深度不同而发生相应的晶体结构相变。在这种情况下判别形成深度只能依据其他标准了, 例如化学成分、氧化还原环境、熔点、密度等。笔者曾对地核矿物的晶体化学及晶体物理做过初步阐述(施倪承等, 2004a)。

表 1 至表 3 测得的 4 种铁族元素金属及其互化物矿物无论从化学成分还是晶体结构上来看均与球粒陨石中的金属物相相似。罗布莎矿物组合中与陨石矿物相似的还有与铁族元素金属矿物密切相关的铁的碳化物及硅化物(Fe、Cr、Ni)-C、Fe₃Si、TiC、W₂C 等。陨石矿物的组合实际上反映了地球早期天文演化阶段核素合成与太阳系星云凝聚过程(欧阳自远, 1988; 盖保民, 1991), 球粒陨石的硅酸盐组分及金属相部分与地球的地幔组成及地核组成不谋而合似乎说明了地球的层圈结构乃是球粒陨石类物质分异作用的结果(陶世龙等, 1999)。因此可以认为罗布莎铬铁矿中的矿物组合同样是地球早期演化和分异作用的结果。作为分异作用的产物, 金属液态铁、镍物质在地幔柱上涌时, 一部分可能与地幔层圈中的 D 层物质发生化学反应形成 Fe₃Si、FeO、SiO₂、Fe 等物质(白文吉等, 2004a, 2004b), 另一部分则保持其铁、镍物质成分及零价状态上升至蛇绿岩铬铁矿体中成为深源包体。因此从矿物群总体组合所显示的环境来看, 其中铁族元素金属及其互化物, 具体来说如表 1 至表 3 列出的镍纹石、铁纹石及钴铁矿来自地核是可能的。

致谢: 本文的若干论点是在白文吉研究员的帮助和启发下形成的, 他的帮助使笔者受益匪浅, 笔者真诚地祝贺白先生50年来取得的丰硕学术成果。本项目研究的所有样品均是方青松研究员精心挑选和制备的, 在此一并表示深切谢意。

Reference

- Auge T. 1988. Platinum_group minerals in the Tiebaghi and Vourinos ophiolitic complex: genetic implications[J]. *Canadian Mineralogist*, 26: 177~ 192.
- Bai W J, Robinson P T. 2000. The PGE and base_metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite. *Southern Tibet*[J]. *Canadian Mineralogist*, 38: 585~ 598.
- Bai Wenji, Robinson P T, Fang Qingsong, *et al.* 2004a. The PGE and base_metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, southern Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(4): 385~ 396(in Chinese).
- Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, *et al.* 2002. Ultra_high pressure minerals: FeO, Fe, FeSi, Si and SiO₂ assemblage from ophiolite in Tibet and its earth dynamic significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(5): 395~ 402(in Chinese).
- Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, *et al.* 2003. A unusual mantle mineral group in ophiolites of Tibet[J]. *Geology in China*, 30(2): 144~ 150(in Chinese).
- Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, *et al.* 2004b. Chemical composition of alloy from podiform chromitites in the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(5): 676~ 682(in Chinese).
- Bai Wenji, Zhou Meifu, Robinson P T, *et al.* 2000. The Mineral Cause of Formation for Been_pod_like chromite in Luobusa of Tibet, Diamond and Its Coexistent Minerals[M]. Beijing: Earthquake Publisher (in Chinese).
- Chamberlain J A, Meleod C R, Trail R J, *et al.* 1965. Native metals in the Muskox intrusion[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 2: 188~ 215.
- Chen Guanrong. 2001. Metallurgy and Metal Materials[M]. Chemical industry Publishing House: 243~ 244(in Chinese).
- Dai Mingquan, Shi Nicheng, Ma Zhesheng, *et al.* 2003. X-ray crystallographic investigation of Fe₂Cr₄Ni alloy from Luobusa, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 74~ 76(in Chinese with English abstract).
- Dick H J B. 1974. Terrestrial nickel-iron from the Josephine peridotite, its geologic occurrence, associations and origin[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 24: 291~ 298.
- Gai Baomin. 1991. The Evolution of Earth[M]. Beijing: Geological Publishing House, 13~ 81(in Chinese).
- Garuti G & Zaccarini F. 1997. In situ alteration of platinum_group minerals at low temperature: evidence from serpentinized and weathered chromitite of the Vourinos complex, Greece[J]. *Canadian Mineralogist*. 35: 611~ 626.
- Huang Yunhui, Yue Shuqin, Qin Shuying, *et al.* 2000. Native Element Single Phase and Their Compounds, History of Minerals in China, Vol.1[M]. Beijing: Geological Publishing House: 197~ 223(in Chinese).
- Melcher F, Grum W, Simon G, *et al.* 1997. Petrogenesis of giant chromite deposits of Kempirsal, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromitite[J]. *Jouanal of Petrology*. 38: 1 419~ 1 458.
- Ouyang Ziyuan. 1988. Astrochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1~ 102(in Chinese).
- Robinson P T, Bai Wenji, John M, *et al.* 2004. Ultra_high pressure minerals in the Luobusa Ophiolite, Tibet, and their tectonic implications. Aspects of the Tectonic Evolution of China[A]. Geological Society, London, Special Publicatios[C]. 226: 247~ 271.
- Shi Nicheng, Bai Wenji, Li Guowu, *et al.* 2005. Crystal chemistry of metallic carbide minerals in the depths of Earth[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(1): 29~ 35(in Chinese).
- Shi Nicheng, Bai Wenji, Ma Zhesheng, *et al.* 2004a. A preliminary study of the crystal chemistry, mineralogy, and ore deposits of earth's core-mantle material[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 169~ 177(in Chinese).
- Shi Nicheng, Ma Zhesheng, Xiong Ming, *et al.* 2004b. crystal structure of (Fe₂Cr₄Ni)₉C₄[J]. *Science in China Ser. D*, 48(3): 338~ 345.
- Stockman H W & Hlava P F. 1984. Platinum_group minerals in Alpine chromitites from southwestern oregon[J]. *Economic Geology*, 79: 491~ 508.
- Tao Shilong, Wan Tianfeng and Cheng Jie. 1999. The Introduction of Earth Science[M]. Beijing: Geological Publishing House, 197~ 223(in Chinese).
- Wilson J T. 1963. A possible origin of the Hawaiian island[J]. *Can. J. Phys.*, 41: 863~ 870.
- Xiong Ming, Shi Nicheng, Dai Mingquan, *et al.* 2003. X-ray crystallographic investigation of Ir-Fe-Ni alloy from Luobusa, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(2): 155~ 161(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, *et al.* 2002. Si₂rutile—an ultrahigh-pressure mineral in ophiolite[J]. *Progress of Nature Science*, 12(11): 1 217~ 1 220(in Chinese).

附中文参考文献

- 白文吉, 方青松, 颜秉刚, 等. 2004a. 藏南罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿中的铂族元素和贱金属合金[J]. *地球学报*, 25(4): 385~ 396.
- 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 2002. 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[J]. *地球学报*, 23(5): 395~ 402.
- 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 2003. 西藏罗布莎蛇绿岩中不寻常的地幔矿物群[J]. *中国地质*, 30(2): 144~ 150.
- 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 2004b. 西藏罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿的合金成分[J]. *地质学报*, 78(5): 675~ 682.
- 白文吉, 周美付, Robinson P T, 等. 2000. 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.
- 陈冠荣. 2001. 冶金和金属材料[M]. 化学工业出版社, 243~ 244.
- 代明泉, 施倪承, 马喆生, 等. 2003. 西藏罗布莎 Fe₂Cr₄Ni 合金的 X 射线晶体学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(1): 74~ 76.
- 盖保民. 1991. 地球演化[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 13~ 81.
- 李国武, 施倪承, 马喆生, 等. 2005. CCD 单晶衍射仪进行单晶德拜衍射研究[J]. *矿物学报*, 25(1): 8~ 12.
- 欧阳自远. 1988. 天体化学[M]. 北京: 科学出版社, 1~ 102.
- 施倪承, 白文吉, 李国武, 等. 2005. 地球深部金属碳化物的晶体化学[J]. *地学前缘*, 12(1): 29~ 35.
- 施倪承, 白文吉, 马喆生, 等. 2004a. 核幔物质晶体化学. 矿物学及矿床学初探[J]. *地学前缘*, 11(1): 169~ 177.
- 施倪承, 马喆生, 熊明, 等. 2004b. (Fe₂Cr₄Ni)₉C₄ 的晶体结构[J]. *中国科学(D 辑)*, 34(6): 521~ 527.
- 陶世龙, 万天年, 程捷. 1999. 地球科学概论[M]. 北京: 地质出版社, 80~ 88.
- 黄蕴慧, 岳树勋, 秦淑英, 等. 2000. 中国矿物志第一卷: 自然元素单质及其互化物矿物[M]. 北京: 地质出版社, 197~ 223.
- 熊明, 施倪承, 代明泉, 等. 2003. 西藏罗布莎 Ir-Fe-Ni 合金的 X 射线晶体学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(2): 155~ 161.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 2002. 蛇绿岩中的一种超高压矿物——硅金红石[J]. *自然科学进展*, 12(11): 1 217~ 1 220.