

doi:10.3799/dqkx.2012.00

地幔超高压条件下镍黄铁矿的一种新结构相——菱面体相： 辽宁金刚石包体的镍黄铁矿晶体结构研究

刘惠芳¹, 李国武², 陆琦¹, 施倪承², 汤中道³, 肖平¹

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学晶体结构实验室, 矿物岩石材料开发应用国家专业实验室, 北京 100083

3. 中国地质大学材料与化学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 从金刚石中获取的包体矿物经电子探针分析其成分与镍黄铁矿相同, 该包体矿物晶体形态完好, 外形为三(六)方对称. 用 CCD 单晶衍射仪对该矿物进行了单晶德拜衍射, 得到的 39 个衍射峰, 经粉末法指标化程序判别和计算, 这些衍射峰分别属于两种结构的镍黄铁矿的衍射峰: 一套为菱面体结构(六方定向)镍黄铁矿的衍射; 另一套属于立方结构的镍黄铁矿结构的衍射. 菱面体结构镍黄铁矿的晶胞参数: $a=0.69062\text{ nm}$, $c=1.72095\text{ nm}$, $V=0.71085\text{ nm}^3$ (六方定向); $a_R=0.69861\text{ nm}$, $\alpha=59.2445^\circ$, $V=0.23695\text{ nm}^3$ (菱面体定向). 菱面体结构的衍射表明该镍黄铁矿在地幔超高压环境中形成, 出现立方结构的衍射, 反映了金刚石破碎后, 该镍黄铁矿包体在常压下相变的结果.

关键词: 菱形结构; 镍黄铁矿; 地幔矿物; 超高压; 金刚石包体.

中图分类号: 文章编号: 1000-2383(2012)03-0000-06

收稿日期: 2011-03-25

Rhombohedral Structure: A New Phase of Pentlandite in Diamond Inclusion from Liaoning, China

LIU Hui-fang¹, LI Guo-wu², LU Qi¹, SHI Ni-cheng², TANG Zhong-dao³, XIAO Ping¹

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Crystal Structure Laboratory and National Laboratory of Mineral Materials, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Pentlandite inclusion presenting perfect crystal form with hexagonal symmetry in a diamond from Liaoning of China was confirmed based on electron microprobe analysis data. X-ray diffraction peaks obtained from single crystal diffractometer with CCD area detector demonstrates that pentlandite has rhombohedral and cubic structures by the powder method indexing procedure distinction and computation. Unit cell parameters of rhombohedral structure are as follows: $a=0.69062\text{ nm}$, $c=1.72095\text{ nm}$, $V=0.71085\text{ nm}^3$ (hexagonal); $a_R=0.69861\text{ nm}$, $\alpha=59.2445^\circ$, and $V=0.23695\text{ nm}^3$ (rhombohedral). The presence of rhombohedral phase in diamond inclusions reveals that the formation condition of the pentlandite in the mantle at ultrahigh-pressure and cubic phase is the results of phase transformation of the pentlandite inclusions in the atmospheric pressure since the diamond breaks.

Key words: rhombohedral structure; pentlandite; mantle mineral; ultra-high pressure; diamond inclusion.

1 样品

金刚石样品来源于辽宁金刚石矿. 金刚石呈完好的八面体, 颗粒直径约 2 mm, 无裂纹, 透明, 由于含较多包裹体, 金刚石具灰色调. 破碎金刚石后, 在

该金刚石中发现的硫化物包体有镍黄铁矿、陨硫铁和磁黄铁矿等. 关于镍黄铁矿的产出形态和成分曾经作过报道(刘惠芳, 2002), 该镍黄铁矿为自形粒状晶体, 产出于金刚石原生孔隙中, 由于在破碎金刚石时, 该包体矿物已碎裂成两部分, 主要部分见图 1a,

基金项目: 自然科学基金项目编号(Nos. 40872043, 49772095).

作者简介: 刘惠芳(1957—), 女, 主要从事矿物岩石检测与研究. E-mail: liuhui-fang@cug.edu.cn

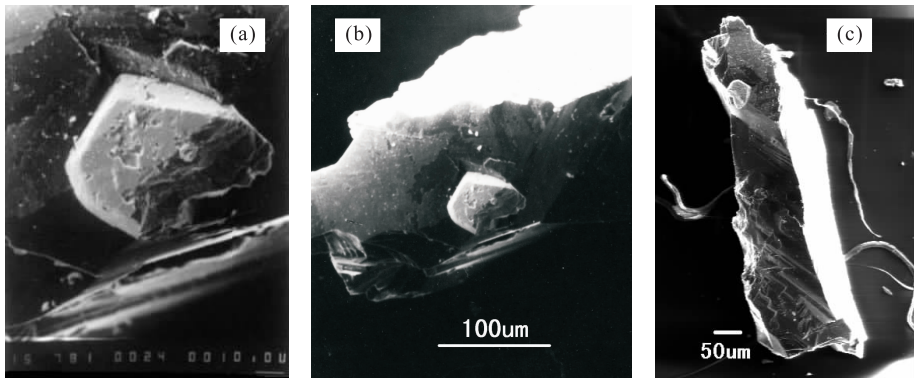


图 1 金刚石中镍黄铁矿包体的形态(电子显微镜照片)

Fig. 1 Micrograph(SEM) of pentlandite in diamond inclusion

a. 镍黄铁矿呈三(六)方对称自形粒状;b. 镍黄铁矿产于金刚石原生孔隙中,尚附着在金刚石上;c. 附着在金刚石碎片上的镍黄铁矿产出形态

表 1 金刚石包体镍黄铁矿的电子探针分析结果(%)

Table 1 Electron microprobe analysis results of pentlandite in diamond inclusion

	Fe	Ni	Co	S	合计	计算分子式	Ni/Fe	Me/S
1	31.06	34.18	0.44	33.17	98.85	(Ni _{4.50} Fe _{4.30} Co _{0.06}) _{8.86} S ₈	1.05	8.86/8
2	30.94	34.13	0.49	34.02	99.58	(Ni _{4.38} Fe _{4.18} Co _{0.06}) _{8.62} S ₈	1.04	8.62/8
3	30.09	34.64	0.48	32.91	99.12	(Ni _{4.60} Fe _{4.34} Co _{0.06}) _{9.00} S ₈	1.04	9/8
4	30.66	34.84	0.50	33.36	98.24	(Ni _{4.56} Fe _{4.22} Co _{0.06}) _{8.84} S ₈	1.08	8.84/8
5	30.94	34.11	0.50	32.84	98.40	(Ni _{4.50} Fe _{4.30} Co _{0.06}) _{8.86} S ₈	1.05	8.86/8
6	32.04	33.52	0.51	33.31	99.38	(Ni _{4.54} Fe _{4.33} Co _{0.07}) _{8.94} S ₈	1.00	8.94/8
7	31.19	34.45	0.51	32.87	99.01	(Ni _{4.40} Fe _{4.42} Co _{0.07}) _{8.89} S ₈	1.05	8.89/8

尚附着在金刚石上(图 1b 和 1c),大小为 $60 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$,根据破碎的两部分照片恢复该矿物的形态为三(六)方对称,发育的晶形为平行双面 $\{0001\}$ 及六方双锥 $\{h0hl\}$ 。

镍黄铁矿的矿物成分用电子探针测定,笔者在以前已报道(刘惠芳,2002),矿物成分均一,7 个不同部位矿物的化学成分见表 1。 $n(\text{Fe}) : n(\text{Ni})$ 近似 $1 : 1$, $[n(\text{Fe}) + n(\text{Ni}) + n(\text{Co})] : (\text{S})$ 接近 $9 : 8$ 。

镍黄铁矿属等轴晶系,关于镍黄铁矿的晶体习性,王濮等(1984)通常将镍黄铁矿描述为粒状或不规则粒状集合体,经常呈叶片状或火焰状规则连生于磁黄铁矿中,系固溶体分离的产物。本次在金刚石中发现的 Fe、Ni 硫化物矿物,成分与磁黄铁矿相同,但晶体形态完好,为三(六)方对称的晶体,而且矿物的拉曼位移与镍黄铁矿无相同之处,因此该矿物不能简单地定名为镍黄铁矿。由于当时结构尚未测定,所以刘惠芳(2002)把该矿物暂定名为六方镍黄铁矿。

本次研究认为在地幔超高压条件下,镍黄铁矿为菱面体结构,具三(六)方对称,在常压条件下,其

菱面体结构将转变为氯化钠型(立方)结构。

2 实验

用 CCD 单晶衍射仪对该矿物进行了单晶德拜衍射,仪器为 Bruker 公司生产 SMART APEX X 射线单晶衍射仪,实验条件:Mo 和 K_{α} ,分别为工作电压、工作电流 45 kV,35 mA,收集强度范围 2θ 为 $3.9^{\circ} \sim 29.4^{\circ}$,其原理和具体方法见文献(李国武等,2005)。

通过对 2θ 的 $3.9^{\circ} \sim 29.4^{\circ}$ 范围(步长 0.02°) 1 275 个衍射数据的详细分析和作图,共得到 39 个衍射峰,经过粉末法指标化程序判别和计算,这些衍射峰可分为两套,分别属于 2 种结构的镍黄铁矿的衍射峰:一套为立方结构的镍黄铁矿结构的衍射,另一套应属于菱面体结构镍黄铁矿的衍射,表 2 中列出了这两套衍射数据,表中还列出了 JCPDS; PDF 30-657 黄铁矿的镍黄铁矿的衍射数据。

用表 2 的衍射数据,通过计算和最小二乘方法

表 2 金刚石包体 Ni、Fe 硫化物矿物的 X 射线衍射数据

Table 2 X-ray diffraction data of Ni, Fe sulfide minerals in diamond inclusion

菱面体结构镍黄铁矿衍射峰 (本次)				立方结构镍黄铁矿衍射峰 (本次)			镍黄铁矿 立方 PDF 30-657		
<i>hkl</i>	计算 <i>d</i> (nm)	实验 <i>d</i> (nm)	<i>Int</i> *	<i>hkl</i>	<i>d</i> (nm)	<i>Int</i>	<i>hkl</i>	<i>d</i> (nm)	<i>Int</i>
				111	0.5675	30	111	0.5794	29
003	0.573 65	0.561 30	s						
101	0.564 94	0.543 30	m	200	0.510 7	16	200	0.501 8	6
102	0.491 11	0.493 00	s	220	0.354 7	8	220	0.354 8	6
104	0.349 26	0.349 20	m						
110	0.345 31	0.341 70	m						
111	0.338 56	0.339 40	m	311	0.300 1	91	311	0.302 6	98
				222	0.289 9	8	222	0.289 7	29
006	0.286 83	0.286 29	w						
202	0.282 47	0.282 74	w						
203	0.265 18	0.266 30	w						
106	0.258 62	0.259 60	w	400	0.250 97	7	400	0.250 89	5
				331	0.227 66	8	331	0.230 31	16
210	0.226 06	0.224 93	w						
205	0.225 74	0.223 22	m	420	0.223 22	4	420	0.224 47	3
				422	0.205 40	5	422	0.204 92	2
				511	0.192 10	30	511	0.193 18	34
009	0.191 22	0.191 39	s						
303	0.188 32	0.188 80	m						
				440	0.175 83	100	440	0.177 43	100
220	0.172 65	0.173 19	w						
305	0.172 51	0.171 76	w						
221	0.171 79	0.171 33	w						
				531	0.169 80	15	531	0.169 67	4
				600	0.166 80	5	600	0.167 27	1
312	0.162 88	0.163 28	w						
209	0.161 10	0.161 14	m						
313	0.159 35	0.158 69	w						
				620	0.157 14	3	620	0.158 69	1
218	0.155 84	0.155 85	w						
				533	0.153 11	22	533	0.153 09	8
				622	0.150 58	20	622	0.151 32	8
				444	0.143 96	5	444	0.144 88	1
0012	0.143 41	0.142 60	m						
404	0.141 24	0.141 54	m						

注: *Int* * :衍射峰相对强度; s, 强; m, 中; w, 弱.

修正,最终求得了菱面体结构镍黄铁矿和立方结构镍黄铁矿的结晶学参数.

菱面体结构镍黄铁矿的晶胞参数: $a = 0.690\ 62\ \text{nm}$, $c = 1.720\ 95\ \text{nm}$, $V = 0.710\ 85\ \text{nm}^3$ (六方定向); $a_R = 0.698\ 61\ \text{nm}$, $\alpha = 59.244\ 5^\circ$, $V = 0.236\ 95\ \text{nm}^3$ (菱面体定向). 立方结构镍黄铁矿的晶胞参数: $a = 1.000\ 7\ \text{nm}$, $V = 1.002\ 10\ \text{nm}^3$, 与 JCPDS, PDF 30-657 镍黄铁矿衍射数据一致.

当立方结构的镍黄铁矿转变为菱面体结构镍黄铁矿时,其体积被压缩, $V/V_0 = 0.946$, 即菱面体镍黄铁矿的体积相对于立方结构镍黄铁矿的体积缩小了 5.4%.

3 讨论

从矿物的电子探针成分可以确定该金刚石包体

矿物是镍黄铁矿成分,并且成分是均匀的.由 PDF 30-657——镍黄铁矿(氯化钠型立方结构)查得镍黄铁矿的粉末衍射数据(表 2),并与本次获得的 39 个衍射峰进行对比,其中有 17 个衍射峰与立方对称的镍黄铁矿衍射峰相符(表 2),说明该包体矿物存在立方结构的镍黄铁矿相.

从 39 个衍射峰中除去 17 个立方结构的镍黄铁矿衍射峰,余下 22 个衍射峰,推测这些衍射峰可能是另一种结构状态的镍黄铁矿的衍射峰,当然这种推测需要进一步的证实该包体矿物存在于金刚石中,晶体完好,外貌似六方(三方)对称;金刚石形成于超高压环境,可以认定该镍黄铁矿也形成于超高压条件.关于氯化钠型结构的硫化物在地幔超高压条件下的结构变化至今尚无报道,但 Shu *et al.* (1998)和 Dubrovinskaia *et al.* (1999)对氯化钠型结构的氧化物(方铁矿—FeO)和碳化物(TiC)在大于 16 GPa 超高压实验条件下进行了其结构测定(详见后),实验表明在超高压条件下,这 2 种化合物的氯化钠型立方结构将转变为菱形结构,原立方结构的部分衍射峰将发生分裂.

根据 Shu *et al.* (1998)和 Dubrovinskaia *et al.* (1999)对氯化钠型氧化物(方铁矿—FeO)和碳化物(TiC)在超高压条件下的实验结果,作者假设该金刚石包体矿物镍黄铁矿也存在菱面体结构相,推测上述无法用立方结构镍黄铁矿晶胞参数指标独立的 22 个衍射峰可能是镍黄铁矿菱面体相的衍射,如果能用镍黄铁矿菱面体相的晶胞参数来指标无法用立方结构镍黄铁矿晶胞参数指标的 22 个衍射,这就证明了该镍黄铁矿中的确存在菱面体结构相.

在未知晶胞参数情况下指标化晶系的粉末衍射是可以进行的(彭志忠,1982),目前有不少计算机程序可以进行直接计算,笔者采用 9214 程序(粉末法指标化程序)对 22 个衍射进行了指标化和面网间距 d 值和晶胞参数最小二乘修正.计算确定用镍黄铁矿菱形结构(六方定向)指标化的面网间距 d 值和实验结果一致(表 2,实际上属镍黄铁矿菱形结构的衍射峰有 23 个,其中(205)衍射峰($d = 0.22322 \text{ nm}$)与立方镍黄铁矿(420)衍射重叠).从而证实了该金刚石包体矿物镍黄铁矿中的确存在菱面体结构相.

在使用 9214 程序时,为简化计算过程,往往先输入晶胞参数的初值.在本次研究过程中,镍黄铁矿菱面体相晶胞参数的初值由以下方法获得:常压下 TiC 等轴晶系, $a = 0.43274 \text{ nm}$,该晶胞体对角线长 =

0.86548 nm (相当于菱面体的 c 轴),已知超高压条件下(38 GPa) TiC 菱面体相 $a = 0.29442 \text{ nm}$, $c = 0.73353 \text{ nm}$,这说明超高压条件下 TiC 的 c 轴被压缩,压缩率为 $0.73353 \text{ (nm)} \div 0.86548 \text{ (nm)} = 0.84754$.立方结构镍黄铁矿的晶胞参数: $a = 1.0038 \text{ nm}$ 立方晶胞体对角线长 = 2.0076 nm ,参照 TiC c 轴的压缩率,计算得到假设的镍黄铁矿菱面体结构相(六方定向)的 c 轴为 $2.00760 \times 0.84754 = 1.70152 \text{ (nm)}$, a 为 $1.0038 \times (0.29442 \div 0.43274) = 0.68295 \text{ (nm)}$.把假定的镍黄铁矿菱面体相的晶胞参数 $a = 0.68295 \text{ nm}$, $c = 1.70152 \text{ nm}$ 及本次实验获得的剩余 22 个衍射峰输入到 9214 程序中,通过计算机计算和最小二乘修正,获得镍黄铁矿菱面体相的晶胞参数和衍射峰 d 值(表 2).从表 2 可见到其理论计算的面网间距 d 值和实验实测得到的面网间距 d 值,两者除低角度 d 值存在一定误差,总体而言吻合程度很好,从而证实了在该金刚石包体镍黄铁矿中的确存在菱面体相.

为了清楚地表明立方结构镍黄铁矿的衍射和菱面体结构镍黄铁矿的衍射的关系,图 2 为该镍黄铁矿立方结构和菱面体结构具体分布.从图 2 可看出立方结构的衍射与菱面体结构的衍射有如下的关系:立方结构的(111)对应于菱面体结构的(003)和(101);(220)对应于菱面体结构的(104)、(110)和(111);(331)对应于菱面体结构的(210)和(205),其中(210)衍射不明显,仅为一个台阶;(511)对应于菱面体结构的(009)和(303)等.

镍黄铁矿(Fe,Ni)₉S₈,等轴晶系,具氯化钠型结构,在该矿物结构中 S 离子作立方最紧密堆积,堆积的方向垂立方晶胞体对角线(111)方向,即 S 离子层的分布方向垂直(111)方向.化学式中的 9 个阳离子(Fe,Ni)有 8 个充填其半数四面体孔隙,另一个充填在八面体孔隙里(王濮等,1984).在地幔超高压环境下,S 离子的堆积比常压条件下要紧密,因此在立方晶胞体对角线方向将压缩,这时立方晶胞将转变为变形的菱面体晶胞,如图 3 所示.

在超高压条件下,氯化钠型结构(立方)向菱面体结构转变,前人有过不少研究,比如具氯化钠型结构的方铁矿、碳化钛相变为菱面体结构. Shu *et al.* (1998)用同步辐射 X 射线衍射技术研究了方铁矿(Fe_{0.947}O)在氦气气氛、30 GPa 下的相变、压力—体积关系、共结晶和内应力.解释了长期以来关于方铁矿(Fe_{0.947}O)高压态下结构的迷惑,证实其晶体结构在高压状态下是菱形已无疑问,这种相变是明显的,

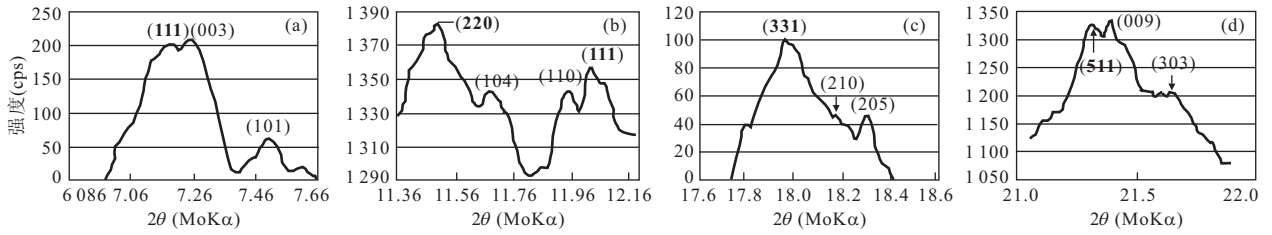


图 2 镍黄铁矿立方结构和菱面体结构的衍射特征

Fig. 2 Diffraction peaks of cubic structure and diffraction peaks of rhombohedral structure for pentlandite

a. 立方结构镍黄铁矿(111)衍射和菱面体结构(003)、(101)衍射; b. 立方结构镍黄铁矿(220)衍射和菱面体结构(104)、(110)、(111)衍射; c. 立方结构镍黄铁矿(331)衍射和菱面体结构(210)、(205)衍射; d. 立方结构镍黄铁矿(511)衍射和菱面体结构(009)、(303)衍射

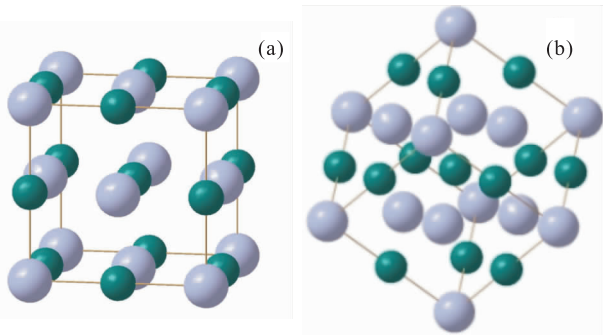


图 3 氯化钠型结构向菱形结构转变示意

Fig. 3 Diagram of NaCl-type structure changed to rhombohedral structure

a. 常压下氯化钠型结构; b. 高压条件下菱形结构; 大球, 表示硫原子; 小球, 表示金属原子

可逆的, 可置换的. 在 18 GPa 时方铁矿 ($\text{Fe}_{0.947}\text{O}$) 晶体(立方)转换为菱形相的 4 个成对域, 原立方晶相的 4 个域的每一个的体对角线“111”对应菱形相的特有 c 轴. Takehiko *et al.* (1985) 利用金刚石砧池高压仪器, 用 X 射线衍射对方铁矿 ($\text{Fe}_{0.98}\text{O}$) 从压力达 120 GPa, 温度从室温至 160 °C, 进行了矿物的结构变化研究, 结果方铁矿 ($\text{Fe}_{0.98}\text{O}$) 在室温、16 GPa 从立方氯化钠型结构变成扭曲的菱形结构; 在该研究中还讨论了从 2.5~14.2 GPa 晶胞体积被压缩的变化 (V/V_0 从 0.9745~0.9269) 和列出了 20 GPa, 25 °C 时方铁矿菱面体相的面网间距 d 值. Jacobsen *et al.* (2005) 用 40 千电子伏的单色同步辐射 X 射线对地幔铁氧化物 (wüstite) 和镁方铁矿进行单晶结构研究, 结果表明 $\text{Fe}_{0.93}\text{O}$ (方铁矿) 在 23 GPa 呈现菱形相. Dubrovinskaia *et al.* (1999) 用原位粉末 X 射线衍射研究了碳化钛 (TiC) 压力自常压至高达 38 GPa 下的相变过程, 观察到了在高于 18 GPa 的似静水力条件下 TiC 由立方结构向(三方)菱面体结构的相变过程. 指出在常温常压下, 碳化钛晶体结

构为 NaCl 型结构. 在超过 10 GPa 的水静压力时, 衍射峰形宽化; 在压力高于 18 GPa, 原立方结构 (111) 和 (220) 峰发生分裂, 而 (200) 峰仍然是一个尖锐的单峰. 衍射峰形的这种变化是因为 TiC 在超高压条件下发生了相变, 立方结构的 (111) 衍射峰分裂成菱面体的 (003) 和 (101) 衍射峰, (220) 衍射峰分裂成 (104) 和 (110) 峰. 该作者在 38 GPa 获得的 TiC (三方) 菱面体结构, 计算的各面网间距值与实验面网间距一致. 以上这些相关的实验研究表明在超高压环境中具氯化钠型结构的矿物将发生相变, 形成新的菱面体相, 而且认为这种相变是可逆的和相互可置换的.

本文的镍黄铁矿从金刚石中获取, 可以肯定其是一种高压矿物. 最初从镍黄铁矿的形貌考虑提出了该矿物具有三(六)方对称, 本次通过 X 射线分析, 得到了在一个镍黄铁矿矿物晶体上同时存在立方结构和菱面体结构 2 个结构相.

今后尚需用立方结构镍黄铁矿进行高压实验, 验证其在高压环境下向菱面体结构镍黄铁矿的相变行为和压力释放后的结构变化, 再另文发表.

4 结论

(1) 该金刚石包体镍黄铁矿是在高压下形成的, 首次提出在地幔高压环境中镍黄铁矿为菱面体结构, 即三(六)方对称, 而非立方(氯化钠型)结构. (2) 由于本次 X 射线分析是在常压下进行的, 因此该高压形成的菱面体结构镍黄铁矿出现立方结构又同时保存了高压条件下菱形相, 这说明了这种相变是可逆的和可置换的.

References

Dubrovinskaia, N. A., Dubrovinsky, L. S., Saxena, S. K., et

- al., 1999. High-pressure study of titanium carbide. *Journal of Alloys and Compounds*, 289(1-2): 24-27. doi:10.1016/S0925-8388(99)00159-0
- Jacobsen, S. D., Lin, J. F., Angel, R. J., et al., 2005. Single-crystal synchrotron X-ray diffraction study of wüstite and magnesiowüstite at lower-mantle pressures. *Journal of Synchrotron Radiation*, 12(5): 577-583. doi:10.1107/S0909049505022326
- JCPDS(The Joint Committee on Powder Diffraction Standards), 2003. PDF 30-657 The Powder Diffraction File of Pentlandite[S].
- Li, G. W., Shi, N. C., Ma, Z. S., et al., 2005. A new method for powder-like diffractograms of small single crystals using a smaet arex CCD detector. *Acta Mineralogica Sinica*, 25(1): 9-14 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. F., 2002. Hexagonal pentlandite and sylvite inclusions in diamond from Liaoning. *Geological Science and Technology Information*, 21(2): 51-54 (in Chinese with English abstract).
- Peng, Z. Z., 1982. Concise textbook of X-ray diffraction. Geological Publishing House, Beijing, 164-175 (in Chinese).
- Shu, J. F., Mao, H. K., Hu, J. Z., et al., 1998. Single-crystal X-ray diffraction of wüstite to 30 GPa hydrostatic pressure. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 172(2-3): 309-323.
- Takehiko, Y. G., Toshihiro, S. K., Akimoto, S. I., 1985. Static Compression of Wüstite($\text{Fe}_{0.98}\text{O}$) to 120 GPa. *Journal of Geophysical Research*, 90(B10): 8784-8788. doi:10.1029/0148-0227/85/004B-5362
- Wang, P., Pan, Z. L., Weng, L. B., et al., 1984. Systematic mineralogy. Geological Publishing House, Beijing, 284-288 (in Chinese).

附中文参考文献

- 刘惠芳, 2002. 辽宁金刚石中的六方镍黄铁矿及钾盐包裹体. *地质科技情报*, 21(2): 51-54.
- 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. *矿物学报*, 25(1): 9-14.
- 彭志忠, 1982. X射线分析简明教程. 北京: 地质出版社, 164-175.
- 王濮, 潘兆鲁, 翁玲宝, 等, 1984. 系统矿物学(上册). 北京: 地质出版社, 284-288.