文章编号：1000-5773(2004)02-0170-07

下地幔温压下(Mg,Fe)SiO_3 钙钛矿的相稳定性
——对冲击回收样品的微观分析*

张 莉[1]，龚自正[1]，刘 红[1,2]，邓力维[1]，薛学东[1]，经福谦[1,3]

(1. 西南交通大学物理研究所，四川成都 610031；
2. 辽宁大学物理系，辽宁沈阳 110036；
3. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900)

摘要：在 60～110 GPa 冲击压力(估算温度为 2300～4800 K)范围内进行了 5 发原始样品为($Mg_{0.92}$,$Fe_{0.08}$)SiO_3 顽火辉石的冲击压缩回收实验，对回收样品进行的 X 射线衍射(XRD)和红外吸收光谱(IR)分析结果表明：(1) 回收样品的主相均是单链状结构硅酸盐，而非钙钛矿结构；(2) 回收样品中均未观察到氧化物 SiO_2 和($Mg_{0.92}$,$Fe_{0.08}$)O 的 XRD 和 IR 特征谱线；(3) 回收样品的 XRD、IR 特征谱线变得简略，并发现了与原始样品有某些不同的特征谱线，随冲击压力增加，这种变化趋于明显。(4) 通过对比冲击压力在 85 GPa 以下和 97 GPa 以上回收样品的 XRD、IR 特征谱线，没有观察到明显的新谱线特征出现。结合先前的冲击 Hugoniot 状态方程实验数据分析，可以认为：在冲击压缩过程中样品处于钙钛矿结构，在冲击卸载过程中样品发生了由钙钛矿结构向单链状结构的逆转相变；特别是，在实验的温度压力范围内，不可能发生由($Mg_{0.92}$,$Fe_{0.08}$)SiO_3 向 SiO_2 和($Mg_{0.92}$,$Fe_{0.08}$)O 的化学分解相变，顽火辉石的高压相——钙钛矿结构是稳定的。回收样品和原始样品的谱线差异可能对应于高压加载或卸载过程引起的某种晶格畸变，而高压加载导致钙钛矿型顽火辉石晶格畸变的可能性更大。这一结果将对下地幔矿物学模型的建立和下地幔地震波探测结果的解释提供基础物理依据。

关键词：顽火辉石；冲击回收；XRD 和 IR 微观分析；(Mg,Fe)SiO_3 钙钛矿的相稳定性；下地幔
中图分类号：O521.21 **文献标识码**：A

1 引 言

通过地球的地震学模型和下地幔候选矿物高压状态方程等大量实验测量结果的对比，近 30 年来人们普遍认为钙钛矿型(Mg,Fe)SiO_3 是下地幔内主要的稳定的矿物组成之一[1～4]。然而，近年来 Meade 等[5]利用激光加热的金刚石压砧技术(LHDAC)通过就位测量(Mg,Fe)SiO_3 的 X 射线衍射能谱(XRD)，观察到在 70 GPa 压力左右，其分解成氧化物(Mg,Fe)O、SiO_2 和钙钛矿的混合物。Saxena 等[6]亦在 LHDAC 实验研究中观察到在 60～90 GPa 之间纯 $MgSiO_3$ 分解成 MgO＋SiO_2 的混合物。霍卉等人[7]计算了钙钛矿型(Mg,Fe)SiO_3 和(Mg,Fe)O 与 SiO_2 混合物的 Hugoniot 压力-密度关系，通过和他人的实验数据对比，表明在 50～160 GPa 冲击压力内，两组相态都有可能是顽火辉石的高温高压相态。而最近 Shim 等[4]利用 LHDAC 技术在 50～106 GPa、1600～2400 K 状态下对(Mg,Fe)SiO_3 进行了 XRD 的就位分析，结果表明，至少在地幔 2300 km 深度钙钛矿型(Mg,Fe)SiO_3 是稳定的，同时不排除 83 GPa 和 1700 K 以上发生微结构相变的可能性。

* **收稿日期**：2003-07-16；**修回日期**：2003-10-15
基金项目：国家自然科学基金重大项目(10299040)
作者简介：张 莉(1980—)，女，博士研究生.
通讯作者：龚自正，教授，主要研究方向为高压物理、地球内部物理. E-mail：gongzz@263.net

由于在整个下地幔温压条件(40～136 GPa、温度约 1 500～3 000 K)下,钙钛矿结构(Mg,Fe)SiO_3是否稳定是关系到下地幔真实矿物学组成、地幔对流模式和物理化学性质等的关键问题,因此,必须进一步确认在与下地幔条件相当的温压下钙钛矿型(Mg,Fe)SiO_3是否保持稳定,澄清现存的上述意见分歧。为此,我们在 60～110 GPa 冲击压力(相应的铜飞片碰撞速度为 4～5.8 km/s,样品中的冲击温度估算为 2 300～4 800 K)范围内进行($Mg_{0.92}$,$Fe_{0.08}$)SiO_3冲击压缩样品的软回收实验,以研究分析高温高压下顽火辉石矿物相微观结构变化,从另一个角度来揭示(Mg,Fe)SiO_3在与下地幔相当的温压下的相稳定性。

2　实　验

2.1　冲击回收实验

冲击回收实验装置如图 1 所示。实验中,铜飞片(尺寸为∅9 mm×2 mm)由二级轻气炮加速驱动,飞片速度 W 用激光束遮断法测量。实验所用顽火辉石的尺寸为∅15 mm×2 mm,基板为∅15 mm×1 mm 的纯铝,用∅15 mm×2 mm 的 A3 钢做垫板。经过精心设计和预备实验后,用无氧铜设计成图 1 中的形状做回收筒,实验证明这种回收筒可在飞片速度高达 6 km/s 时对样品进行成功回收。

2.2　样品制备

实验所用的顽火辉石(Enstatite)矿物采自河北省张家汉诺坝的大麻坪矿,其产出系来自天然的地幔岩包裹体中。矿物提纯采用磁选法用 WCF-2 多用磁性分析仪除去强磁和弱磁性的杂质矿物,除去绝大多数伴生的橄榄石、基性长岩、蛇纹石等杂质,使样品中顽火辉石含量达 97%以上。将提纯后的样品用球磨机研磨至全部通过 300 目筛(粉末颗粒直径小于 50 μm)。后用磁球吸出研磨过程中混入的铁粉,再用稀 HCl 溶液清洗直至彻底除去混入的铁粉。稀 HCl 对顽火辉石不发生化学反应。将粉末样品置于高强度石墨模具中,在高温热压炉中(37 MPa、1450 ℃、一大气压纯氩气保护)经过 2 h 加压焙烧成胚型。胚型经磨削、抛光至设计尺寸的圆片状样品,供实验之用。实验所用原始样品的化学成分见表 1,X 射线粉末衍射(XRD)图见图 2(a)。实验所用样品可以表征为($Mg_{0.92}$,$Fe_{0.08}$)SiO_3顽火辉石,是单链状结构顽火辉石。

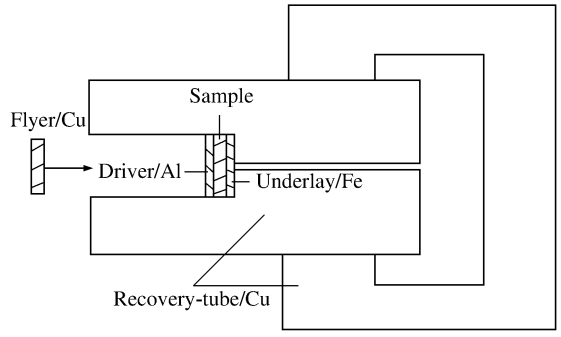


图 1　冲击回收实验装置示意图

Fig. 1　Assembly sketch for shock recovery experiment

表 1　原始样品的化学成分

Table 1　Chemical composition of original sample

Composition	w/(%)
SiO_2	51.45
MgO	38.37
FeO	5.70
Fe_2O_3	1.21
CaO	1.27
Other	2.0

2.3　对回收样品的微观分析

对不同冲击压力下回收获得的粉体用 XRD 法和红外吸收光谱(IR)进行微观结构分析。所用的 X 射线管压 50 kV,管电流 200 mA,扫描速度为 8°/min。用 Cu K_α 射线源的单色 X 衍射光束,波长为 0.154 05 nm,收集了 2θ 在 10°到 80°角度范围内的数据,X 衍射仪的测量精度为 0.02°。IR 分析在 PE-983G 型红外吸收光谱分析仪上进行。

3　结果和分析

针对以往高压实验观察到钙钛矿结构顽火辉石发生相变的压力区间 60～90 GPa,我们在 60～

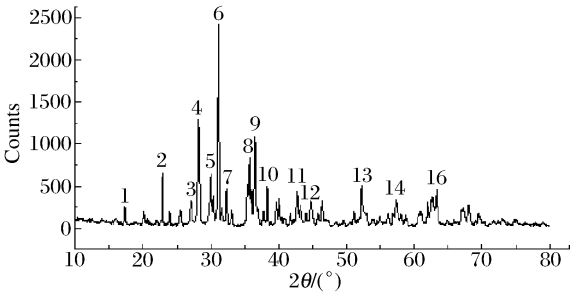
110 GPa 之间成功进行了 5 个压力点的冲击回收实验。样品中的冲击压力由实验测到的飞片撞击速度和样品已知的 Hugoniot 参数根据阻抗匹配法计算得到，实验中所用样品及飞片、基板、垫板的 Hugoniot 参数见表 2。对初始密度为 3.06 kg/cm^3 的 $(Mg_{0.92},Fe_{0.08})SiO_3$ 样品，冲击波速度(u_s)和粒子速度(u_p)[8]的关系式为

$$u_s = 3.76(\pm 0.24) + 1.48(\pm 0.07)u_p \tag{1}$$

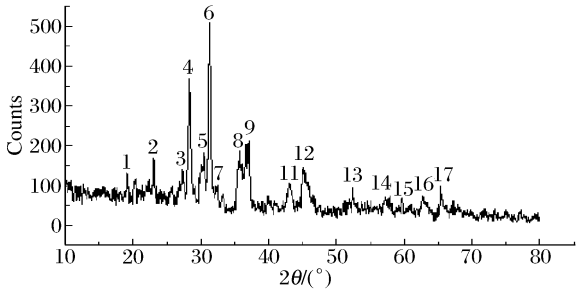
表 2 实验所用样品、飞片、基板、垫板的 Hugoniot 参数

Table 2 Hugoniot parameters of sample, flyer, driver and gasket

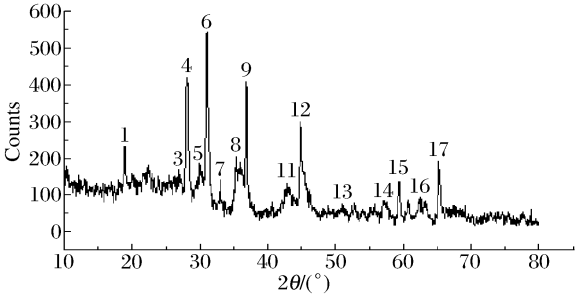
Material	ρ_0 /(g/cm^3)	c_0 /(km)	λ	Ref.
$(Mg,Fe)SiO_3$	3.06	3.76	1.48	[8]
Cu	8.93	3.940	1.489	[9]
Al	2.70	5.386	1.339	[9]
A3 steel	7.87	3.800	1.58	[10]



(a) XRD pattern of original sample



(b) XRD pattern of recovery sample at 85 GPa



(c) XRD pattern of recovery sample at 97 GPa

图 2 顽火辉石样品的 X 射线衍射图

Fig. 2 XRD pattern of $(Mg_{0.92}, Fe_{0.08})SiO_3$ sample

相应的冲击温度 T_H 由下式给出[10]

$$T_H = T_0\exp(\gamma_0\eta) + \frac{c_0^2}{c_V}\exp(\gamma_0\eta)\int_0^\eta \frac{\lambda\eta^2}{(1-\lambda\eta)^3}\exp(-\gamma_0\eta)\mathrm{d}\eta \tag{2}$$

$$\eta = 1 - \rho/\rho_0 \tag{3}$$

式中：T_0 是室温，γ_0 为常态下的 Grüneisen 系数，c_0 和 λ 为样品的 Hugoniot 参数，其值见表 2，c_V 为定容比热。计算中有关参数的取值是：$T_0 = 300$ K，$\gamma_0 = 1.4$[11]，$c_V = 0.831$ J/(g·K)[11]。根据实测到的飞片撞击速度 W 计算得到的每发实验样品中的冲击波速度 u_s、波后粒子速度 u_p、压力 p_s 和温度 T_H 列于表 3 中。

表 3 冲击回收实验条件

Table 3 Conditions for shock recovery experiment

No.	W/(km/s)	ρ_0/(g/cm^3)	u_p/(km/s)	u_s/(km/s)	p_s/(GPa)	T_H/(K)
1	4.01	2.95	2.77	7.98	65.21	2 303
2	4.52	3.00	3.09	8.43	78.10	3 003
3	4.78	3.00	3.26	8.66	84.71	3 357
4	5.25	2.98	3.58	9.11	97.15	4 106
5	5.56	3.07	3.73	9.31	106.67	4 728

3.1　XRD 分析结果

回收样品的 XRD 分析结果见图 2。由于回收的实验难度加之初始样品的质量只有 1.1 g，1、2、5 号的样品回收量较少，使得衍射峰不很明显，而且通过分析发现，1、2、3 号样品的谱线基本一致，而 4、5 号样品的情况也非常接近，因此只列出冲击压力为 85 GPa 和 97 GPa 的 XRD 谱线，作为分析问题的关键所在。为了便于比较，图中同时给出了原始样品的 XRD 分析结果。图中标记的主要谱线数据列入表 4 中。从图 2 中可以清楚地看出：

(1) 5 发回收样品的主相均与原始样品相同，是单链状结构的顽火辉石，而非钙钛矿结构。

(2) 5 发回收样品中均未观察到氧化物 (Mg,Fe)O 和 SiO_2 的特征谱线。

(3) 特别需要注意的是在 XRD 谱线中可以看到，冲击压力为 97 GPa 的回收样品在 d 值为 0.464 02 nm、0.155 42 nm 和 0.142 91 nm 的峰值较冲击压力为 85 GPa 的回收样品在 d 值为 0.467 91 nm、0.154 69 nm 和 0.142 58 nm 的峰值明显增高，而原始样品的谱线图没有发现这几个峰。而在原始样品中标记的 d 值为 0.234 63 nm 的峰在冲击压力为 85 GPa 和 97 GPa 的回收样品中都没有观察到。对这几条谱线，我们首先排除了分解氧化物的可能，同时根据目前的数据不能证明出现了新物质。因此，这一微小的谱线异常我们解释为可能对应于高压加载或卸载过程引起的结构变化(比如单链状结构——钙钛矿结构)或是晶格畸变，而高压加载所致钙钛矿型顽火辉石结构变化或晶格畸变的可能性更大。

(4) 在冲击压力为 85 GPa 的回收样品的谱线图中，d 值为 0.386 18 nm 的峰与原始样品中 d 值为 0.388 19 nm 的峰对应，在 97 GPa 的回收样品的谱线图中也可以观察到这个峰值，但是过于微弱，所以没有标记出来。对比冲击压力在 85 GPa 以下和 97 GPa 以上回收样品的 XRD 特征谱线，没有观察到有明显的新谱线特征出现。

总之，在覆盖以往高压实验观察到钙钛矿结构顽火辉石发生相变的压力区间内，没有充足的证据可以确证随压力和温度增加顽火辉石发生了分解相变或明显的结构相变。

表 4　原始及回收样品以数字标记的衍射峰 d 值

Table 4　d values of diffraction peaks marked with numbers

No.	d/(nm)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0*	0.510 97	0.388 19	0.328 52	0.316 73	0.297 31	0.287 33	0.276 67	0.251 22	0.245 83
3	0.464 02	0.386 18	0.327 46	0.315 19	0.293 12	0.285 62	0.275 10	0.251 29	0.242 25
4	0.467 91	—	0.331 39	0.316 95	0.298 29	0.287 87	0.270 88	0.253 28	0.243 71
No.	d/(nm)								
	10	11	12	13	14	15	16	17	
0*	0.234 63	0.211 43	0.202 48	0.174 93	0.160 55	—	0.146 75	—	
3	—	0.210 26	0.200 48	0.174 43	0.161 04	0.154 69	0.148 10	0.142 58	
4	—	0.210 87	0.202 00	0.173 39	0.161 30	0.155 42	0.148 48	0.142 91	

Note: * Origin sample.

3.2　IR 分析结果

5 发回收样品的 IR 分析结果见图 3。波数在 1 200～300 cm^{-1}范围内的谱图主要显示顽火辉石晶格振动的变化特性。图 3 显示，在 300～1 200 cm^{-1}的波数范围内，IR 光谱可以清楚地分为 1 150～800 cm^{-1}、800～600 cm^{-1}、600～300 cm^{-1}3 个吸收波段。其中 900～1 200 cm^{-1}之间的吸收峰反映顽火辉石中 Si－O 和 Si－O－Si 键伸缩振动引起的强吸收带，600～800 cm^{-1}之间的一群弱峰反映顽火辉石 Si－O 键弯曲振动引起的吸收带。从图 3 可以清楚地看出：

(1) 所有冲击后的样品谱线较之原始样品的谱线变得简略，可能是由于冲击后样品的晶体对称性增加所致。在硅氧键伸缩振动和弯曲振动吸收区，谱线分裂减少。

(2) 压力在 85 GPa 以下的 3 发实验在红外谱线上基本没有明显差别，但需要注意的是压力在

85 GPa 左右的光谱线在 1 015 cm^{-1} 处较前两发实验不同，此处出现了较为明显的一个吸收带。

(3) 在冲击压力高于 97 GPa 的两发实验，较压力较低的实验的 IR 谱有了较大的变化，红外谱线显示吸收频率在 1 077 cm^{-1} 处的吸收带峰值增加，可以看出晶体对称性进一步增加。从这些变化可以推测随压力增加，样品的晶格畸变增加，与 XRD 结果一致。

(4) 在 5 发回收样品中，都没有观察到(Mg,Fe)O 和 SiO_2 的特征频率谱线出现。

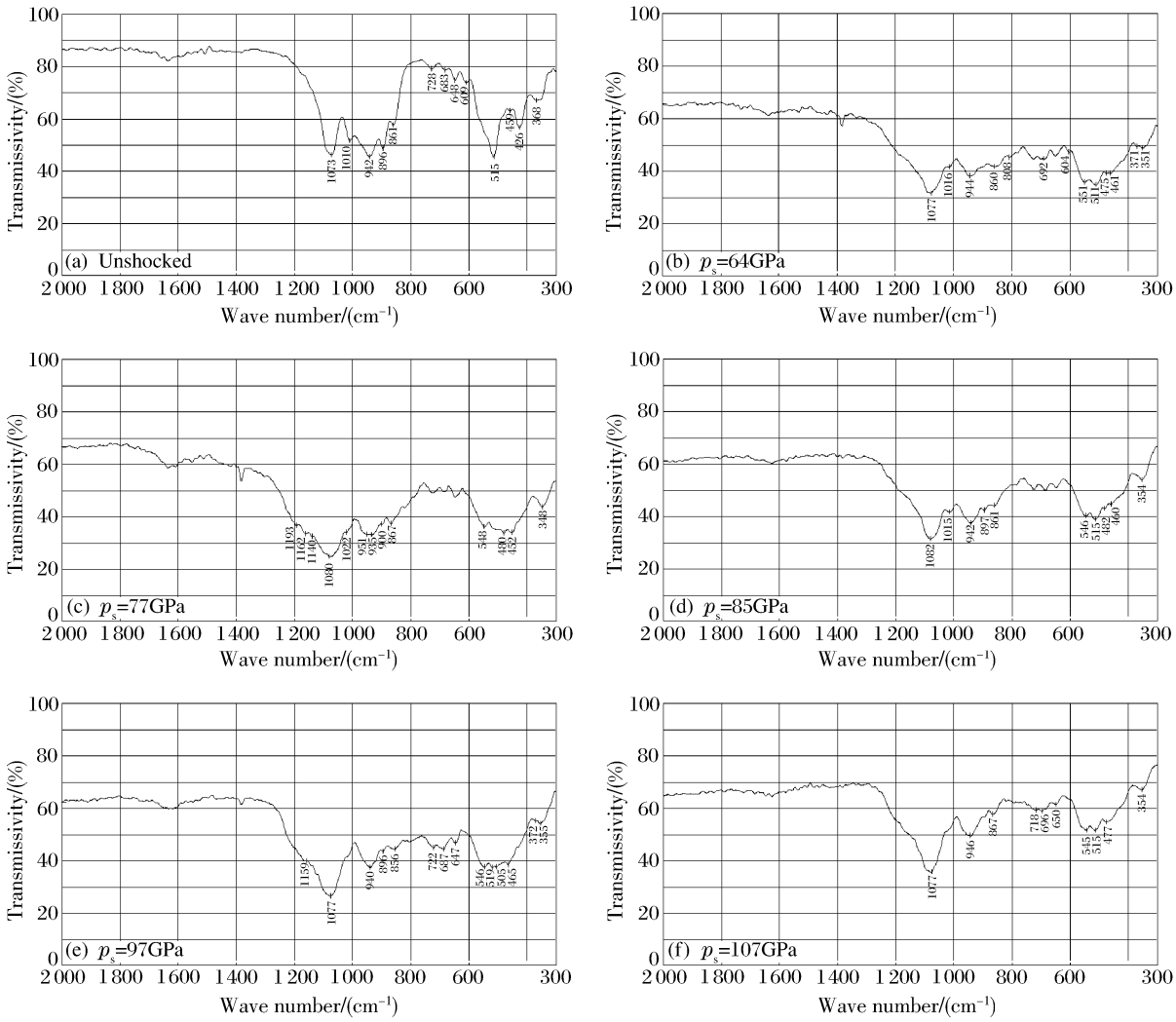


图 3 顽火辉石样品的 IR 谱线

Fig. 3 IR spectra pattern of $(Mg_{0.92},Fe_{0.08})SiO_3$

3.3 讨论

综合分析静高压(DAC)实验和冲击波动高压实验，以往对顽火辉石高温高压相研究结果可以归结为：在 40 GPa 冲击压力(或 30 GPa 静高压、1 500K)以上时，顽火辉石转变为其高压相——钙钛矿型结构，这一点已经取得了共识[1,8,12~15]。但对在 40～130 GPa 压力和 1 500～3 000 K 温度范围内，钙钛矿型(Mg,Fe)SiO_3 一直保持稳定，或在 70～90 GPa 压力之间发生向氧化物(Mg,Fe)O(mw)＋SiO_2(St)的化学分解相变的问题则存在争议。

根据本文对回收样品的 XRD 和 IR 分析，首先，回收样品的 XRD 和 IR 谱线中均未观察到氧化物的特征谱线，则表明无论是卸载后还是加载过程中都没有出现氧化物。从另一个角度来考虑，假设顽火辉石高压相在冲击波作用下发生分解，生成氧化物(Mg,Fe)O 和 SiO_2，那么在卸载过程的极短时间内

不可能完成合成反应而回复到顽火辉石的结构，因为不同晶体结构之间的相变所需的时间要长于冲击卸载的时间[16]，因此我们认为在卸载过程中不可能发生分解氧化物向顽火辉石的转变，从而否定了冲击加载过程中发生分解相变的可能性。这与我们最近对$(Mg_{0.92},Fe_{0.08})SiO_3$的 Hugoniot 方程实验测量的分析结果一致[8]。由于回收样品的 XRD 和 IR 均不是钙钛矿结构而与原始样品接近，而且冲击波 Hugoniot 方程实验测量表明在 40 GPa 冲击压力以上时，顽火辉石转变为其高压相——钙钛矿结构，因此可以确证卸压过程中发生了由钙钛矿结构向单链状初始结构的逆转相变。在以前的实验研究中也报道过钙钛矿结构发生逆转变化的结果[17]。在冲击波作用下某些物质会形成亚稳态，而在卸载过程中容易转变到更加稳定的结构[16,18]。对于(Mg,Fe)SiO_3，静高压实验[5]可以回收到钙钛矿结构。然而，冲击波实验本身的特性，包括高压作用时间，卸载速率等，都会对钙钛矿结构能否保存下来产生影响，因此推断在卸载过程中发生结构的逆转变化是合理的。

同时我们认为，可能由于冲击压力作用下钙钛矿结构发生的晶格畸变致使回收样品的谱线与原始样品产生某些差异，在卸载过程中畸变不能完全回复，而且这种畸变随冲击压力增加而增加，静高压的实验结果[19]报道了这样的变化。最近的 LHDAC 实验结果[4]指出，在 83 GPa 和 1700 K 以上不排除发生从 *Pbnm* 钙钛矿结构到 $P2_1/m$、*Pmmn* 或 $P4_2/nmc$ 钙钛矿结构的相变的可能性，高压声速测量实验所显示的迹象[20]也预示了有在相同温压范围发生结构相变的趋势。但是在回收样品的谱线分析中没有发现充足的证据表明顽火辉石在冲击压缩过程中发生了结构相变，不排除在卸载过程中的逆转变化掩盖了结构相变的证据。

4　结　论

通过在 60～110 GPa 冲击压力内(Mg,Fe)SiO_3 回收样品的 XRD 和 IR 分析，可以认为：在实验的温度压力范围内，不可能发生由(Mg,Fe)SiO_3 向(Mg,Fe)O 和 SiO_2 的化学分解相变，顽火辉石的高压相——钙钛矿结构是稳定的。在冲击压力作用下样品的钙钛矿结构可能发生了晶格畸变，这种畸变随冲击压力增加而增加。同时没有充足的证据表明顽火辉石在冲击压缩过程中发生了结构相变。

感谢西北核技术研究所林俊德院士和唐润棣研究员在冲击回收实验装置设计中提供的建议和帮助。冲击回收实验是在西北核技术研究所周刚研究员、唐润棣研究员、胡泽根研究员、张向荣副研究员的大力协助下完成的。

References:

[1] Knittle E, Jeanloz R. Synthesis and Equation of State of (Mg,Fe)SiO_3 Perovskite over 100 Gigapascals [J]. Science, 1987, 235: 668－670.

[2] Kellogg L H, Hager B H, van der Hilst R D. Compositional Stratification in the Deep Mantle [J]. Science, 1999, 283: 1881－1884.

[3] Shim S H, Duffy T S, Shen G. Stability and Structure of $MgSiO_3$ to 2300-Kilometer Depth in Earth's Mantle [J]. Science, 2001, 293: 2437－2440.

[4] Kesson S E, Fitz Gerald J D, Shelley J M. Mineralogy and Dynamics of a Pyrolite Lower Mantle [J]. Nature, 1998, 393: 252－255.

[5] Meade C, Mao H K, Hu J. High-Temperature Phase Transition and Dissociation of (Mg,Fe)SiO_3 Perovskite at Lower Mantle Pressures [J]. Science, 1995, 268: 1743－1745.

[6] Saxena S K, Dubrovinsky L S, Lazor P, et al. Stability of Perovskite ($MgSiO_3$) in the Earth's Mantle [J]. Science, 1996, 274: 1357－1359.

[7] Huo H, Gong Z Z, Jing F Q. High-Pressure State of Enstatite and Its Implication in Geophysics [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 12(2): 132－138. (in Chinese)
霍　卉，龚自正，经福谦. 高压下顽火辉石的相态及其在地球物理中的应用 [J]. 高压物理学报，1999，12(2)：132－138.

[8] Gong Z Z, Dai F, Zhang L, et al. Equation of State and Phase Stability of Mantle Perovskite up to 140 GPa Shock Pressure and Its Geophysical Implications [J]. Geophys Res Lett, 2004, 31: L04614, doi: 10.1029/2003GL019132.

[9] Duffy T S, Ahrens T J. Sound Velocities at High Pressure and Temperature and Their Geophysical Implications [J]. J Geophys Res, 1992, 97: 4503－4520.

[10] Jing F Q. Introduction to Experiment Equation of State (2nd ed) [M]. Beijing: Science Press, 1999. 194, 356. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引（第二版）[M]. 北京：科学出版社，1999. 194，356.

[11] Anderson O L, Masuda K, Isaak D G. Limits on the Value of δ_T and γ for $MgSiO_3$ Perovskite [J]. Phys Earth Plan-

et Inter,1996,98:31－46.
[12] Liu L G. Silicate Perovskite Form Phases Transformation of Pyrobe-Garnet at High Pressures and Temperatures [J]. Geophys Res Lett,1974,1:277－280.
[13] Ito E,Matsui Y. Synthesis and Crystal-Chemical Characterization of $MgSiO_3$ Perovskite [J]. Earth Planet Sci Lett,1978,38:443－450.
[14] McQueen R C,Marsh S P,Fritz J N. Hugoniot Equation of State of Twelve Rocks [J]. J Geophys Res,1967,72:4999－5036.
[15] Watt J R,Ahrens T J. Shock Wave Equation of State of Enstatite [J]. J Geophys Res,1986,91(B7):7495－7503.
[16] DeCarli P S,Milton D J. Stishovite:Synthesis by Shock Wave [J]. Science,1965,147:144－145.
[17] Chen J,Weidner D J,Vaughan T. The Srength of $(Mg_{0.9},Fe_{0.1})SiO_3$ Perovskite at High Pressure and Temperature [J]. Nature,2002,419:824－826.
[18] Jackson I,Ahrens T. Shock Wave Compression of Single-Crystal Forsterite [J]. J Geophys Res,1979,84(B6):3039－3048.
[19] Fiquet G,Dewaele,Andrault D,et al. Thermoelastic Properties and Crystal Structure of $MgSiO_3$ Perovskite at Lower Mantle Pressure and Temperature Conditions [J]. Geophys Res Lett,2000,27:21－24.
[20] Gong Z Z,Xie H S,Jing F Q,et al. High-Pressure Sound Velocity of Perovskite-Enstatite and Possible Composition of Earth's Lower Mantle [J]. Chinese Phys Lett,1999,19(9):695－697.

Stability of $(Mg,Fe)SiO_3$-Perovskite at Lower Mantle Pressure and Temperature Conditions

ZHANG Li[1],GONG Zi-Zheng[1],LIU Hong[1,2],DENG Li-Wei[1]
XUE Xue-Dong[1],JING Fu-Qian[1,3]

(1. *Institute of Physics,Southwest Jiaotong University,Chengdu* 610031,*China*;
2. *Department of Physics,Liaoning University,Shenyang* 110036,*China*;
3. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,*
Institute of Fluid Physics,CAEP,Mianyang 621900,*China*)

Abstract: Shock recovery experiments of $(Mg_{0.92},Fe_{0.08})SiO_3$ enstatite were conducted at pressure range from 60 to 110 GPa (the corresponding temperature is estimated as 2 300～4 800 K). X-ray diffraction (XRD) and infrared absorption spectra (IR) of the recovered samples indicate that:(1) The main phase of recovered samples is single-chain structure enstatite,not the perovskite structure;(2) There is no evidence for the existence of oxides SiO_2 and $(Mg_{0.92},Fe_{0.08})O$ in the recovered samples;(3) After shock compression,some peaks different from original sample were found and these differences are getting more obvious with the increasing of pressure;(4) No obviously different peaks were found between the recovered samples below 85 GPa and those above 97 GPa,from the comparison of XRD and IR spectra among these samples. Combined with the former analysis of experiments of Hugoniot equation of state of enstatite,it was considered that enstatite transformed into perovskite structure under shock compression. The microanalysis requires retrogressive transformation of shocked samples during the process of pressure release. Especially,there is no possibility for the chemical decomposition reaction of $(Mg_{0.92},Fe_{0.08})SiO_3$ to oxides SiO_2 and $(Mg_{0.92},Fe_{0.08})O$ occurring under shock compression,so the high-pressure phase of enstatite－perovskite structure remains stable at the experimental conditions. Meanwhile,we attribute the spectra difference between original sample and recovered samples to a crystal distortion under shock compression or release process and the loading process more probably resulted in such distortion. The results of this investigation provide basic physical evidence for the minerals composition model and the interpretation of seismic wave data for the lower mantle.

Key words: enstatite;shock recovery;XRD and IR microanalysis;stability of $(Mg,Fe)SiO_3$-perovskite;lower mantle