

## 上地幔橄榄石电导率影响因素及高压相变初探

代立东<sup>1,2</sup>, 李和平<sup>1</sup>, 王多君<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 人们对上地幔标志性矿物橄榄石的认识,基本上是经过一个从直流到交流,又从交流到阻抗谱的认识过程. 本文主要通过讨论对橄榄石电导率的影响因素出发,包括温度、压力、铁镁比值、氧逸度等因素的影响和制约. 用目前国际高温高压学术界公认的阻抗谱技术探讨了橄榄石在高压下的相变,并在此基础上,进一步研究地球物理学家非常关心的热点问题—冷地幔的实验室的模拟,并作了充分的论证.

**关键词** 橄榄石, 电导率, 相变, 高温高压, 铁镁比值, 氧逸度, 冷地幔

**中图分类号** P315

**文献标识码** A

**文章编号** 1004-2903(2003)02-0256-05

## Electrical conductivity and high pressure phase transition study on the influential factors in the upper-mantle olivine

DAI Li-dong<sup>1,2</sup>, LI He-ping<sup>1</sup>, WANG Duo-jun<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Materials and Fluid of the Earth Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate school of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** It is widely accepted opinion that we have known the signal mineral in the upper mantle, on the whole, coming from direct current to alternating current, and from alternating current to impedance spectroscopy. In this paper, we mainly discuss the electrical conductivity influential factors in the upper-mantle olivine conductivity, including to temperature, pressure, magnesium and iron ratio, oxygen fugacity, and so on. By virtue of the impedance spectroscopy means, high-pressure phase transition of olivine is discussed. On the basis of this research, another hot point problem—cooling mantle simulation is well demonstrated.

**Keywords** olivine, electrical conductivity, phase transition, high temperature, high pressure, magnesium iron ratio, oxygen fugacity, cooling mantle

## 0 引言

作为上地幔主要代表性矿物的橄榄石,长期以来,对于橄榄石的电学性质的研究一直是地球物理学家关注的焦点. 在绝大多数关于地壳和上地幔矿物模型中橄榄石大约占 50%~60%<sup>[1]</sup>. 但迄今为止,橄榄石电导率的实验室就位测量大多停留在直流法<sup>[2-4]</sup>和单频交流法<sup>[5,6]</sup>水平. 本文是继 Xu 等<sup>[7]</sup>最近将阻抗谱测量技术引入高温高压下人造多晶橄榄石及美国 San Carlos 橄榄石的电导率就位测量并获得成功,并且该方法目前在国际上已被认为是高温高压下固体地球物质电导率实验室就位测量中最先进的方法,但关于在阻抗谱技术条件下,分析橄榄石

电导率的影响因素和高压下相变在国内外尚属于首例.

## 1 橄榄石电导率的影响因素

上地幔橄榄石电导率主要受到以下四个因素的影响和制约:①温度,②频率,③铁镁比值,④氧逸度.

## 1.1 温度

温度作为一个独立变量对电导率的影响国外很多专家在很早就有报道, Duba<sup>[8]</sup>提出了温度对电导率的影响符合下面的公式:

$$\sigma = \sigma_x \exp(-A_x/KT). \quad (1)$$

收稿日期 2002-11-02; 修回日期 2003-01-20.

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-124)资助.

作者简介 代立东,男,硕士,1977年生,2001年毕业于中国地质大学(武汉),现就读于中国科学院地球化学研究所,主要从事高温高压下地球深部物质与流体作用方向的研究.

式中  $\sigma$  代表电导率,  $\sigma_x$  代表在指定的温度下  $\log\sigma$  与温度  $T$  的与纵轴的截距,  $A_x$  代表活化焓,  $K$  代表 Boltzmann 常数,  $T$  代表绝对温度(K).

朱<sup>[9]</sup>认为橄榄石电导率与温度的关系与 Duba 的观点相近,符合 Arrhenius 公式

$$\sigma = \sum_{0,i} \exp(-E_{ai}/KT). \quad (2)$$

并对公式里代表意义的解释作了比较详细的说明,  $i$  表示特定的传导机制,  $\sigma_{0,i}$  温度为无穷大时,第  $i$  种传导机制的电导率,  $T$  为绝对温度(K),  $K$  为 Boltzmann 常数,  $E_{ai}$  是该传导机制的活化能.

当温度升高时,橄榄石电导率升高,而且电导率与温度的倒数成很好的线性关系,这种关系可能是随温度的升高,使矿物中载流子增多或引起传导机制的改变.一般来说,在一定的温度范围内,以一种的传导机制为主,在另温度范围内可能以另一种传导机制为主,从而在  $\log\sigma - 1/T$  关系图上存在不连续性.因此,把低温实验结果外推到高温时要慎重.

## 1.2 频率

传统测量上地幔的单晶或多晶橄榄石多采用直流法和单频交流法.在直流法测量橄榄石电导率中,存在很大的问题是在测量的过程中,产生了样品极化问题.在单频交流法中,由于颗粒边界电容、样品-电极界面电容及两电极间电容的存在使得电导率对频率存在依赖性.认为电导率与频率没有关系或者说频率对橄榄石的测量影响很小,传统的测量方法没有鉴别出电导率对频率的依赖关系,这主要与测量的技术有关,以前对电导率的测量一般使用的方法为单频直流,使用的频率较高或频率变化范围较窄.

但自从 Roberts<sup>[10]</sup>将阻抗谱技术引进高温高压研究领域以来,对电导率的测量带来了革命性的变化,频率对电导具有重要影响,主要是因为在不同频率范围内,矿物岩石的颗粒内部、颗粒边缘和样品电极具有不同的电学行为.阻抗谱技术在地球深部物质科学研究中的广泛应用是因为它可以消除频散效应,频散效应是颗粒边缘电导与颗粒内部电导串联,而导致有效电导降低的现象.

橄榄石的交流复阻抗  $Z^*$  用来表示在交流信号作用下物质对电流的总的阻碍作用,它由实部(电阻  $R$ )和虚部(电容  $C$ )两部分组成的,其数学表达式为

$$Z^* = Z_r - jZ_i. \quad (3)$$

其中  $Z_r$  为实部,  $Z_i$  为虚部,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $Z_r$  和  $Z_i$  用实测的模  $|Z|$  和相角  $\phi$  来表示:

$$Z_r = |Z| \cos\phi, \quad Z_i = |Z| \sin\phi.$$

将所获得的数据投影在复平面上,就得到不同的阻抗弧,各个阻抗弧具有不同的弛豫时间  $\tau$  ( $\tau = RC$ )和相应的一个或多个导电过程.实验获得的阻抗数据可用阻抗谱和等效电路来分析,从而获得特定的传导和极化机制的参数  $R$  和  $C$  (有关阻抗谱的原理和数据处理方法详见文献[11,12]).

## 1.3 镁铁比值

橄榄石中的镁铁比值对电导具有重要的影响,在考虑变价元素铁对电导率的影响时,地球物理学家通常用铁浓度 ( $X_{Fe}$ ) 和铁分散系数来标定 ( $K_D$ )<sup>[13]</sup>:

$$X_{Fe} = Fe/(Mg + Fe), \quad (4)$$

$$K_D = \frac{Mg(M_2) \times Fe(M_1)}{Mg(M_1) \times Fe(M_2)}. \quad (5)$$

$M_1$  和  $M_2$  表示铁和镁在橄榄石中不同位置的分布.大量的实验实验表明,橄榄石的电导率随铁浓度的增大而增大,而铁活化能随铁浓度的增加呈连续下降的趋势.Jaoul<sup>[14]</sup>等在压力 0.5 ~ 9 GPa 和温度 873 K ~ 1 173 K 研究橄榄石和尖晶石在高温下的相变过程中分散系数发现,橄榄石在转变为尖晶石,其分散系数 ( $K_D$ ) 为

$$K_D = K_{D0} \exp(-E/RT) \exp(\epsilon X_{Fe}) (-PV/RT). \quad (6)$$

$K_{D0}$  表示指前因子,  $E$  表示活化能,  $R$  表示理想气体常量,  $\epsilon$  表示介电常数,  $X_{Fe}$  表示铁浓度,  $P$  和  $V$  分别表示实验控制的压力和体积,  $T$  绝对温度(K).  $X_{Fe}$  变化 0 ~ 0.1, 其电导率增加了 8 个数量级,但电导率的变化具有不连续性,表明橄榄石在高温相变其导电机制发生了变化,并在此基础上测定了 San Carlos 橄榄石的  $X_{Mg}$  平均值为 0.9.

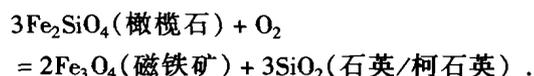
## 1.4 氧逸度

绝大多数地幔橄榄石矿物中,都含有变价元素铁,它们所处的氧逸度环境决定了橄榄石晶格点缺陷特征,主要包括:点缺陷的种类、浓度、点缺陷间的微观相互作用等<sup>[15]</sup>,从而对橄榄石的物理性质晶格亚结构及稳定场产生重要影响.

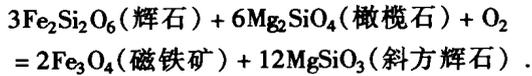
### 1.4.1 上地幔橄榄石中自由氧的存在形式

上地幔氧逸度作为地幔流体的基本性质之一很大程度上决定了地幔的性质状态及过程的发生与发展.上地幔与橄榄石相关的自由氧的基本形式<sup>[16-19]</sup>如下:

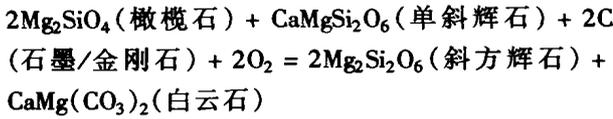
(a) FQM:



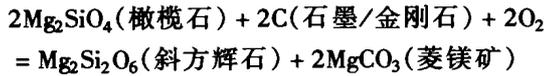
(b) OPM:



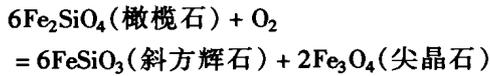
(c) GEDOD 或 DEDOC:



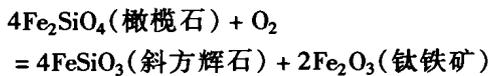
(d) EMDG 或 EMOD:



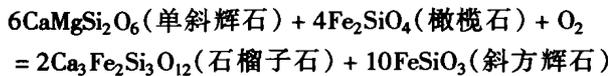
(e) 尖晶石方辉/二辉橄榄石:



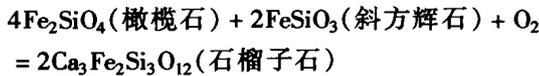
(f) 钛铁矿方辉/二辉橄榄石:



(g) 石榴子石二辉橄榄石:



(h) 石榴子石方辉橄榄石:



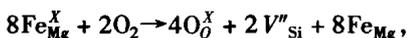
在这 8 种主要类型的上地幔橄榄石氧参与的反应,氧无论作为反映物或者生成物都与变价元素铁关系密切,变价金属离子的活度与氧逸度密切相关,因此地幔氧逸度将对有变价元素参与的诸如地幔交代、元素配分等过程产生重要影响。

#### 1.4.2 氧逸度对电导率的影响

橄榄石无论是天然形成的,还是人工合成的;也无论是橄榄石单晶还是多晶,在晶格之间不可避免地存在点缺陷,这些点缺陷是受热力学条件控制的,热力学条件的改变会使物质变得很不稳定,其中氧逸度是控制点缺陷的重要因素.点缺陷的改变是影响矿物岩石电导率的重要因素,而氧逸度控制着矿物晶格中点缺陷的活度<sup>[19]</sup>。

根据点缺陷原理,橄榄石与外界氧进行原子交换可发生一系列的缺陷反应.点缺陷采用标准的 Kroger 和 Vink 标记法.  $X_Y^Z$  为一个原子( $X$ )或空位( $V$ )所在的位置, $Y$ 为正常原子占据的位置, $Z$ 为该位置上的有效电荷('表示正电荷,·表示负电荷, $x$ 表示电中性, $e$ 为电子, $h$ 为空穴, $I$ 为间隙原子)。

铁橄榄石与氧交换发生如下缺陷反应<sup>[9]</sup>:



$$K_{\text{fo}_2} = [\text{F}_{\text{Mg}}^x] 8[V_{\text{Mg}}'']^2 [V_{\text{Si}}''] .$$

若电中性条件为

$$[\text{Fe}_{\text{Mg}}^x] = 4[V_{\text{Mg}}''] = 8[V_{\text{Si}}''] ,$$

$$\text{则有 } \sigma \propto [\text{Po}_2]^{1/5.5} .$$

Constable<sup>[20]</sup>对橄榄石单晶和多晶以及纯橄岩的电导率与氧逸度关系时,发现橄榄石电导率与氧逸度具有如下的关系

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma(f_{\text{O}_2})^{1/7} . \quad (7)$$

Wanamaker<sup>[21]</sup>等分别在自缓冲和辉石缓冲条件下对橄榄石的[100]方向的电导率与氧逸度的关系,得到

$$\sigma^{[100]} = 2.27 e^{-0.55/KT} f_{\text{O}_2}^{0.18} + 306.3 e^{-2.25/KT} f_{\text{O}_2}^{0.12}$$

(自缓冲条件),

其传导主要方式为极化子  $\text{Fe}_{\text{Mg}}$  和电子  $e'$  .

$$\sigma^{[100]} = 0.18 e^{-0.34/KT} f_{\text{O}_2}^{0.17} + 15.2 e^{-1.3/KT}$$

(辉石缓冲条件),

其传导机制为极化子  $\text{Fe}_{\text{Mg}}$  和镁空位( $V_{\text{Mg}}''$ ) .

Bai<sup>[22]</sup>在对锰橄榄石不同温度电导率的研究发现,温度 1 223 ~ 147 K 变化,电导率对氧逸度的依赖程度不同.在单晶的三个主轴方向上,电导率对氧逸度的依赖性也存在差别.Shock 等<sup>[23]</sup>对合成镁橄榄石的研究在[010]和[100]方向电导率对氧逸度的依赖性相似,也存在两种受氧逸度控制的传导机制.[100]方向比[010]方向的电导率要高,[001]方向电导率最高,且几乎不依赖于氧逸度,这表明电导率在不同晶格方向上存在着各向异性的性质。

#### 2 橄榄石的高压相变

橄榄石高压下的相主要有两种:橄榄石-瓦兹利石(Wadsleyite,  $\beta$  相,又称畸变尖晶石)和林伍德石(Ringwoodite,  $\gamma$  相,又称尖晶石).Ringwood<sup>[24]</sup>在研究  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ - $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  系列的富  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  部分时发现,在  $\alpha$  相和  $\gamma$  相之间存在一个畸变的尖晶石相,命名为  $\beta$  相.并且研究了  $\beta$  相的密度在  $\alpha$  相和  $\gamma$  相之间.从 1 873 K 时,  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ - $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  体系的  $P$ - $T$  相图<sup>[25]</sup>看出,压力相同时,  $\beta$  相的稳定温度范围较高,且随压力增高  $\beta$  相稳定范围向高温区扩展.温度太低时(400 ~ 500 °C),  $\beta$  相不稳定,随着压力的升高,  $\alpha$  相直接相变为  $\gamma$  相。

谢<sup>[26]</sup>认为:成分变化对各高压相的压力稳定范围有很大的影响.两个端元压力稳定范围相差约 10.0 GPa,而且当  $\text{Mg}$ - $\text{Fe}$  橄榄石中  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  含量在 45% 以上时,没有  $\beta$  相存在.假定上地幔橄榄石的成分为  $(\text{Mg}_{0.9}\text{Fe}_{0.1})\text{SiO}_4$ ,在 1 873 K 条件下,  $\beta$  相的压力稳定范围为 14.0 ~ 14.5 GPa, 14.5 GPa 以上  $\beta$  相转变成  $\gamma$  相。

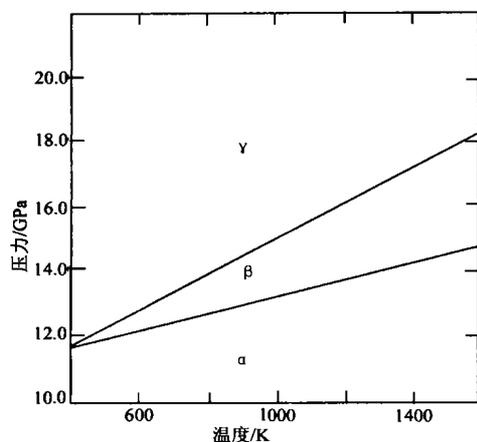


图1 1873 K时  $Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$  体系的压力-成分相图

Fig.1 Relationship of the  $Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$  systematic pressure-composition  
 $\alpha$ . 相橄榄石;  $\beta$ . 畸变尖晶石;  $\gamma$ . 林伍德石  
 (Mao, et al., 1982)

由于高压电导率的测量技术相对一个大气压条件下难度要大得多,在地幔高压相的电导率研究相对较少.虽然早在1965年Akimoto<sup>[27]</sup>通过对富含 $Fe_2SiO_4$ 橄榄石( $\alpha$ 相)及其多形林伍德石就发现,在橄榄石与林伍德石发生相转变后,其电导率升高了两个数量级,并进而提出了过渡带电导率的急剧升高可能是由地幔矿物在410~660 km深度发生了相变引起的.Xu<sup>[28]</sup>在多面顶压机上,在样品和绝缘体之间设计一个与大地零电势相连的金属盾,运用平行电极方法,就位测量San Carlos橄榄石及其高压相的电导率.金属盾的作用可以控制氧逸度,可以减少测量过程的漏电,还可以减少样品室的温度梯度.研究表明,瓦兹利石和林伍德石的电导率相似,两者的电导率几乎是橄榄石电导率的两倍.其原因可能主要有两个:①瓦兹利石和林伍德石中的 $Fe^{3+}$ 含量比橄榄石中 $Fe^{3+}$ 高得多<sup>[29]</sup>;②瓦兹利石和林伍德石中的相邻离子之间的跃迁距离比橄榄石中的更短<sup>[30]</sup>.

### 3 冷地幔成因解释的一些实验证据

地球内部存在一个冷地幔引起了地球物理学家的广泛兴趣.从莫霍面到深度84 km范围内,上地幔的温度低于正常的地幔温度值,具有冷地幔特征.纯橄岩的电导率与环境温度关系密切,这为大地电磁测深方法来研究地球深部热状态提供了地球物理前提.西藏西部的改则地区至鲁谷以巨厚的岩石圈为特征,莫霍面深度为71 km<sup>[31]</sup>.Wang<sup>[32]</sup>在中国科学

院地球化学研究所YJ-3000吨六面顶紧装式压机上,在1.0~4.0 GPa和643~1093 K条件下,利用干燥的纯橄岩做实验样品,通过阻抗谱分析仪进行电导率的测定.实验依据是温度与电导率的一一对应关系,在压力3.0 GPa条件下所获得的电阻率中,1023 K的电阻率为1929.5  $\Omega/m$ ,与马<sup>[33]</sup>测得的青藏高原西部大地电磁测深鲁则至改谷地区上地幔上部电阻率大于2000  $\Omega/m$ 的结论相悖,因此得出了与孔相同的结论.同时也考虑了样品中地幔水的影响,此实验数据是在不含有水的情况下获得的,如果上述的反演在上地幔岩石空隙中含有少量的水流体,电阻率也将会成数量级降低,在此条件下,为满足大地电磁测深结果的上地幔上部电阻率大于2000  $\Omega/m$ 这一条件,84 km处上地幔的温度上限更应该比1023 K低.

朱茂旭<sup>[34]</sup>等利用高温高压技术研究了在地幔400~670 km深的过渡带,他用高压技术验证了高导层,而Wang<sup>[32]</sup>等也用同样的方法验证了冷地幔,他们的差别在于所选择的样品和实验的温度压力以及实验的频率有较大的差异.

### 4 小结与讨论

4.1 目前在橄榄石的影响因素中,关于变价元素铁的研究比较多,而对其他的上地幔的变价元素研究较少.

4.2 目前对于地幔的高导层研究的比较多,而对地幔中存在的冷地幔研究相对较少,冷地幔理论可以解释很多前人不能解释的许多的关于上地幔假说,冷地幔的提出会对地球深部物质科学的研究,必然会产生重大的影响,因此今后必须在找到更多的除了纯橄岩以外其他的上地幔典型的矿物岩石是否能同样的在高温高压技术中得到支持.

4.3 对多晶橄榄石和天然橄榄石的研究比较多,而对单晶橄榄石和人工合成橄榄石的研究比较少,而把这这四种都放在一块在相同的条件下,报道的几乎没有,因此可以有必要在今后的工作中加强这方面的工作.

4.4 橄榄石干样品体系的高温高压氧逸度自由控制一直是国际高温高压界急待解决的一大难题.迄今为止,还没能找到在高温高压体系的任意氧逸度的自由调节的可靠的方法,因此氧逸度的自由调节将成为将来高温高压领域最有前景的一个领域,如果将来科学家能获得足够可靠的地幔氧逸度数据,构建定量的地幔氧逸度时空分布图,将会使人类关

于地幔的认识甚至整个地球其他领域的研究水平可望发生质的飞跃。

### 参 考 文 献 (References):

- [1] Lastovickova M. A review of laboratory measurements of the electrical conductivity of rocks and minerals[J]. *Phys Planet Inter*, 1991, 66: 1 ~ 11.
- [2] Bradley R S, Jamil A, Munro D C. The electrical conductivity of olivine at high temperatures and pressures[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28, 1669 ~ 1678.
- [3] Kobayashi Y, Maruyama H. Electrical conductivity of olivine single crystals at high temperature [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1971, 11: 415 ~ 419.
- [4] Duba A. Electrical Conductivity of olivine [J]. *J Geophys Res*, 1972, 77: 2483 ~ 2495.
- [5] Cemic L, Will G, Hinze E. Electrical conductivity measurements on olivines  $Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$  under defined thermodynamic conditions [J]. *Phys Chem Minerals*, 1980, 6, 95 ~ 107.
- [6] Hirsch L M, Wang C Y. Electrical conductivity of olivine during high-temperature creep [J]. *J Geophys Res*, 1986, 91 (B10): 10429 ~ 10441.
- [7] Xu Y S, Poe B T, Shankland T J, *et al.* Electrical conductivity of olivine, Wadsleyite, and Ringwoodite under upper-mantle conditions [J]. *Science*, 1998, 280: 1415 ~ 1418.
- [8] Duba A. The electrical conductivity of lherzolite [J]. *J Geophys Res*, 1993, 98, 885 ~ 899.
- [9] 朱茂旭, 谢鸿森. 地球深部物质电学性质实验研究[J]. *地球科学进展*, 1998, 13, 438 ~ 446.
- [10] Roberts J J, Tyburczy J A. Impedance spectroscopy of single and polycrystalline olivine: evidence for grain boundary transport [J]. *Phys Chem Minerals*, 1993, 20: 19 ~ 26.
- [11] Huebner J S, Dillenaug G D. Impedance spectra of dry silicate minerals and rock: qualitative interpretation of spectra [J]. *Am Mineral*, 1995, 80: 46 ~ 64.
- [12] 朱茂旭, 谢鸿森, 郭捷等. 高温高压下蛇纹石电学性质的阻抗谱分析[J]. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(6): 634 ~ 641.
- [13] Will G, Nover G. Influence of oxygen partial pressure on the Mg/Fe distribution in olivines [J]. *Phys Chem Minerals*, 1979, 4: 199 ~ 208.
- [14] Jaoul O, Alvarez B Y, Liebermann R C *et al.* Fe-Mg interdiffusion in olivine up to 9 GPa at  $T = 600 \sim 900^\circ\text{C}$ ; experimental data and comparison with defect calculations [J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1995, 89, 199 ~ 218.
- [15] Hirsch L M, Shankland T J. Equilibrium point defect concentrations in MgO: understanding the mechanisms of conduction and diffusion and the role of Fe impurities [J]. *J Geophys Res*, 1991, 96: 385 ~ 403.
- [16] Li H P, Xie H S, Guo J, *et al.* In situ control oxygen fugacity at high temperature and high pressure: A Ni-O system [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(6): 817 ~ 820.
- [17] Li H P, Xie H S, Guo J, *et al.* In situ control oxygen fugacity at high temperature and high pressure [J]. *J Geophys Res*, 1999, 104 (B12): 29439 ~ 29451.
- [18] 李和平, 谢鸿森, 郭捷等. 高温高压氧逸度的就位控制[J]. *自然科学进展*, 1999, 9(4): 325 ~ 335.
- [19] 刘丛强, 李和平, 黄智龙, 等. 地幔氧逸度的研究进展 [J]. *地学前缘* (中国地质大学, 北京), 2001, 8(3): 73 ~ 82.
- [20] Constable S, Duba A. Electrical conductivity of olivine, a dunite and the mantle [J]. *J Geophys Res*, 1990, 95(B1): 6967 ~ 6978.
- [21] Wanamaker B J, Duba A G. Electrical conductivity of San Carlos olivine along [100] under oxygen- and pyroxene-buffer conditions and implications for defect equilibria [J]. *J Geophys Res*, 1993, 98(B1): 489 ~ 500.
- [22] Bai Q, Wang Z C, Kohlstedt D L. Manganese olivine I: electrical conductivity [J]. *Phys Chem Minerals*, 1995, 22: 489 ~ 503.
- [23] Shock R N. Electrical conduction in olivine [J]. *J Geophys Res*, 1989, 94: 5829 ~ 5839.
- [24] 林伍德, A. E. 王道德等译. 地幔的成分和岩石学 [M]. 北京: 地震出版社, 1981: 218 ~ 271.
- [25] Mao H K. Iron-magnesium fractionation medal for the earth [M]. In: Akimoto S I and Manghnani M H eds., *High-Pressure Research in Geophysics*. Center for Academic Publications Japan, Tokyo, pp: 319 ~ 328.
- [26] 谢鸿森著. 地球深部物质科学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 134 ~ 156.
- [27] Akimoto S and Fujisawa H. Demonstration of the electrical conductivity jump produced by the olivine-spinel transition [J]. *J Geophys Res*, 1965, 70: 443 ~ 449.
- [28] Xu Y S, McCammon C, Poe B T. The effect of alumina on the electrical conductivity of silicate perovskite [J]. *Science*, 1998, 282: 922 ~ 924.
- [29] O, Neil H St C, Mc Cammon C A, Canil D, *et al.* Mossbauer spectroscopy of mantle transition zone phases and determination of minimum  $Fe^{3+}$  content [J]. *Am Mineral*, 1993, 78: 456 ~ 460.
- [30] Kamb B. Structural basis of the olivine-spinel stability relation [J]. *Am Mineral*, 1968, 53: 1439 ~ 1455.
- [31] 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏. 青藏高原西部综合地球物理剖面和岩石圈结构与动力学 [J]. *科学通报*, 1999, 44(12): 1257 ~ 1265.
- [32] Wang D J, Li H P, Liu C Q, *et al.* Experimental study on electrical conductivity of dunite at high temperature and pressure—The evidence of electrical conductivity of cold mantle in the Gaize-Lugu area [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(24).
- [33] 马晓冰, 孔祥儒, 于晨. 青藏高原西部大地电磁深探测结果. *科学通报*, 1997, 42(11): 1185 ~ 1187.
- [34] 朱茂旭, 谢鸿森. 大陆中下地壳电学性质实验研究 [J]. *地质科技情报*, 1999, 18(4): 215 ~ 220.