

蒋建军,代立东,李和平,等. 地球内部物质电学性质原位测量的影响因素和导电机制——以地壳矿物为例[J]. 地球科学进展, 2013, 28(4): 455-466. [Jiang Jianjun, Dai Lidong, Li Heping, et al. Influential factors and conduction mechanisms of the in-situ electrical conductivity measurements of Earth's interior materials: A case study on crustal minerals[J]. Advances in Earth Science 2013, 28(4): 455-466.]

地球内部物质电学性质原位测量的影响因素 和导电机制——以地壳矿物为例*

蒋建军^{1,2}, 代立东^{1*}, 李和平¹, 单双明¹, 胡海英¹, 惠科石^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所地球内部物质高温高压实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 高温高压下矿物岩石电导率的实验研究数据, 不仅是人们了解地球内部物质组成及其演化过程的重要窗口, 而且可以为野外大地电磁测深和地磁测深反演提供重要约束。重点介绍了温度、压力、水含量、铁含量、氧逸度、熔融等矿物岩石电导率的影响因素, 深入阐述了存在于矿物岩石的 4 种主要导电机制, 即离子、质子、小极化子和大极化子。回顾近年来地壳主要造岩矿物(长石、石英和辉石)的电导率实验研究取得的新成果, 讨论了它们的导电机制和地球物理意义, 并对其目前存在的问题及尚需进一步展开的工作进行了探讨。

关键词: 矿物岩石; 电导率; 影响因素; 导电机制; 高温高压

中图分类号: P319 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2013)04-0455-12

矿物岩石的电导率对自身的物理化学性质、所处热力学条件与地球化学环境具有高敏感性, 因此, 高温高压下矿物岩石的电导率是人们探究地球内部物质组成、状态和性质的重要物理参数之一。它还常与大地电磁测深(Magnetotelluric, MT)和地磁测深(Geomagnetic Deep Sounding, GDS)结合, 为反演地球内部的矿物组成、化学成分、热力学状态、水的分布、部分熔融以及物质运动等过程提供约束^[1-6]。

1 主要影响因素

矿物岩石的电导率随着自身的化学组成和所处环境的变化而不同。原位测量获得的电导率值可以看成是温度、压力、水含量、铁含量、氧逸度和熔融分

数等的函数: $\sigma = f(P, T, C_w, X_{Fe}, f_{O_2}, \dots)$ 。

1.1 温度

温度对矿物岩石电导率的影响非常显著, 一般情况下, 电导率随着温度的升高而增大^[6]。大多数矿物岩石在高温下, 其电学性质类似于半导体^[7]。半导体的导电是由其中多数载流子的扩散引起^[8]的, 主要取决于载流子的浓度和自扩散系数, 可描述为:

$$\sigma = Dcq^2 / (kT) \quad (1)$$

式中: D 为自扩散系数, q 为载流子的有效电荷 ($q = ze$, e 为电子的电量, z 为化合价), c 为载流子浓度, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度(K)。

温度对电导率的影响来自于 2 个方面: 载流子浓度对温度的依赖性和热活化迁移率对温度的依赖

收稿日期: 2012-10-15; 修回日期: 2013-03-04.

* 基金项目: 中国科学院地球化学研究所“135”项目; 国家自然科学基金项目“高温高压下不同氧逸度、水含量、成分和电子自旋态转变的方铁矿电导率的实验研究”(编号: 41174079)资助。

作者简介: 蒋建军(1987-), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 主要从事高温高压下矿物岩石电学性质研究。

E-mail: jiangjianjun1987@126.com

* 通讯作者: 代立东(1977-), 男, 黑龙江巴彦人, 副研究员, 主要从事高压矿物物理实验研究. E-mail: dailidong@vip.gyig.ac.cn

性。在实际研究中,温度与电导率的关系常写成^[9]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a/kT) \quad (2)$$

上式表明, $\lg\sigma$ 与 $1/T$ 呈线性关系。但在足够大的温度范围内得到的 $\lg\sigma - 1/T$ 的图可能为非线性或会出现数个线性区(图 1), 在各个线性区常用公式(3)来拟合:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_{01} \exp(-E_{a1}/kT) + \sigma_{02} \exp(-E_{a2}/kT) + \dots \\ &= \sum_{i=1}^n \sigma_{0i} \exp(-E_{ai}/kT) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: E_{ai} 和 σ_{0i} 分别为第 i 段线性区的活化能和指前因子。

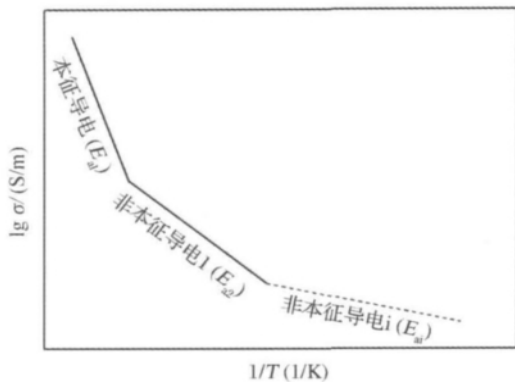


图 1 $\lg\sigma$ 与 $1/T$ 关系的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of logarithm of electrical conductivity and the reciprocal temperature

随着温度升高引起的斜率变化,常常意味着导电机制的改变
The variation of the gradient at elevated temperatures always indicates the change of charge transport mechanism

1.2 压力

压力对电导率的影响可以通过它与活化体积 ΔV 的关系来表征:

$$\sigma = \sigma_0 \exp[(E_a + P\Delta V)/kT] \quad (4)$$

在较低压力时,随着压力升高,样品孔隙度降低,导致电荷迁移因载流子运输通道的变窄而变慢,电导率降低^[10,11]。而压力升至几个 GPa 时,样品孔隙几乎全部闭合,压力对电导率的影响变小。与温度相比,压力对电导率的影响比较微弱,有时可忽略不计^[12]。但当硅酸盐样品处于熔融状态时,压力可改变矿物的熔融温度 T_g , 进而影响样品的电学性质,导致电导率改变几个数量级(图 2)^[13,14]。

1.3 水

水在一系列地球内部物理化学过程中扮演了重要角色,对矿物岩石的熔融过程、传输特性等有重要

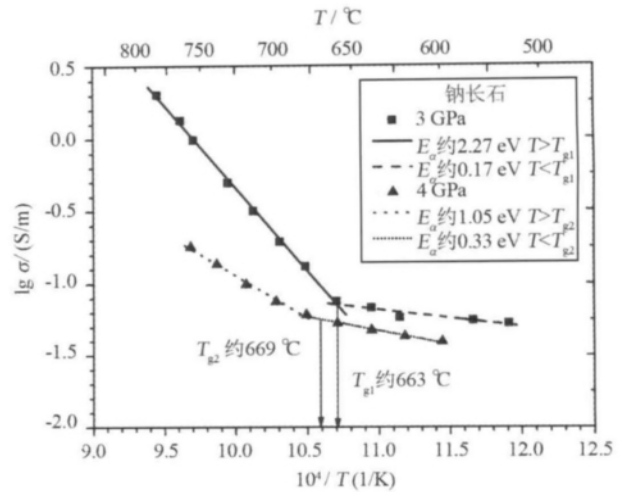


图 2 压力改变熔融温度,影响钠长石样品的电导率^[14]

Fig. 2 Pressure dependence of T_g , and the effect on electrical conductivity of albite sample^[14]

影响,能极大地改变物质的电学和力学等物理性质^[15]。

矿物中自由水的存在可能改变矿物内部的连通状态,使电导率升高。Shimozuku 等^[16]在 1 GPa, 527 ~ 727 °C 的条件下,发现含水流体的体积分数为 4.3×10^{-4} 时能使石英单晶的电导率提高 1.5 个对数单位。Gaillard^[17]和 Pommier 等^[18]对干的和含水的硅酸盐熔体进行了电性测量,认为水的存在将提高样品中主要载流子——钠离子的迁移率,使样品电导率升高。

矿物中的结构水是造成地球深部电导率异常的重要原因,少量结构水便能极大地提高样品的电导率^[19~22]。Huang 等^[15]用公式(5)表示水含量对瓦兹利石和林伍德石电导率的影响:

$$\sigma = AC_w^r \exp(-H_a/kT) \quad (5)$$

式中: A 和 r 为常数, C_w 为水的质量百分含量, H_a 为活化焓。

拟合得到瓦兹利石和林伍德石的电导率 σ 分别与 $C_w^{0.66 \pm 0.05}$ 和 $C_w^{0.69 \pm 0.03}$ 成正比。结合已有的地球物理数据, Huang 等^[15,23,24]估算得到北太平洋地区地幔转换带的水含量为 0.1% ~ 0.2% (质量百分含量) 远大于该地区反演得到的上地幔水含量,表明地幔中的水在圈层中的分布不同。

Dai 等^[25]和 Manthilake 等^[26]分别在 15 和 16 GPa 下研究了水对瓦兹利石电导率的影响,测得了不同水含量样品的活化焓(图 3), Dai 等^[25]还同时考虑了氧逸度的影响,得到:

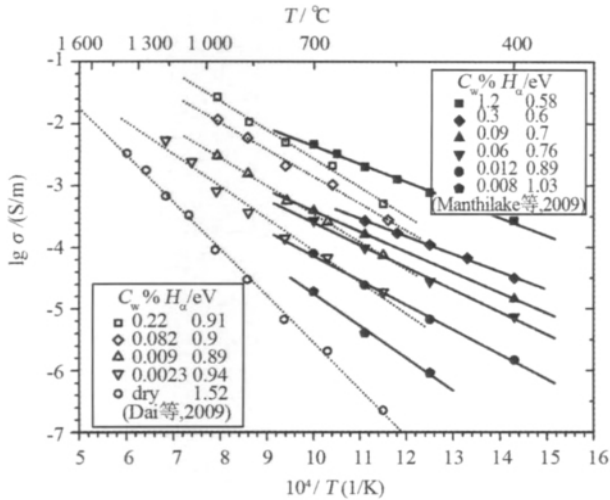


图 3 水含量对瓦兹利石电导率的影响^[25 26]

Fig. 3 The effect of water content on the electrical conductivity of wadsleyite^[25 26]

$$\sigma = AC_w^r f_{O_2}^n \exp(-H_a/kT) \quad (6)$$

式中: A , r , n 为常数。通过实验数据测得指数 r 为 0.72 ± 0.08 。

在一些含水矿物中,水还可以通过脱水作用的方式来影响电导率,样品中因脱水形成的高导电网络可以导致电导率升高^[27]。

1.4 铁

含铁硅酸盐矿物中,由于铁原子外层电子受原子核束缚很弱,电子很容易在不同价态的铁离子和亚铁离子之间移动^[28]。在大多数的矿物中,三价铁离子都是以杂质的形式存在,很容易占据晶格中二价离子 (Fe^{2+} 和 Mg^{2+}) 的位置,产生处于禁带中的杂质能级,使更多电子被激活成载流子^[29]。所以,当样品中的铁含量升高时,矿物电导率急剧升高(图 4)。

Hirsch 等^[30]利用 LCR 仪测量了不同铁含量的橄榄石单晶样品(100)方向的电导率,发现电导率与铁含量存在如下关系:

$$\sigma = \frac{10^{6.54}}{T} X_{Fe}^{1.81} \exp\left(\frac{-1.35}{kT}\right) \quad (7)$$

式中: $X_{Fe} = Fe/(Fe + Mg)$, 为样品中的铁镁摩尔比, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度。

Yoshino 等^[31]采用交流阻抗谱方法测量了不同铁含量林伍德石的电导率,发现所得数据能很好地拟合公式(8):

$$\sigma = AX_{Fe} \exp\left(\frac{-H_0 + \alpha X_{Fe}^{1/3}}{kT}\right) \quad (8)$$

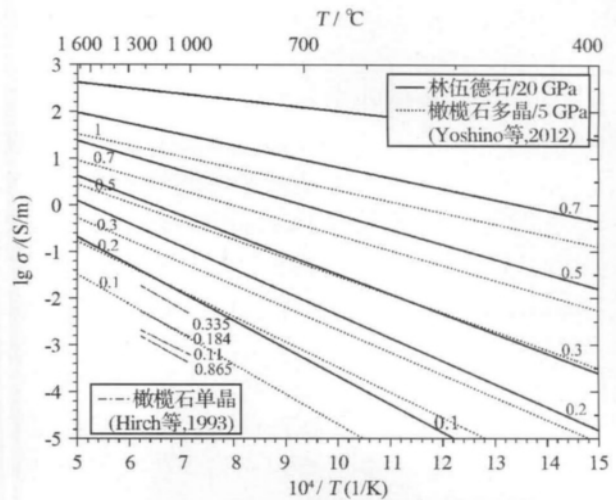


图 4 铁含量对橄榄石和林伍德石电导率的影响^[28 30]

Fig. 4 The effect of iron content on electrical conductivities of olivine and ringwoodite^[28 30]

式中: A 和 α 为常数, H_0 为活化焓。

1.5 氧逸度

对于含变价元素的样品,氧逸度是重要的实验变量,它控制着样品晶格中点缺陷化学过程,能对样品的电学性质产生重要影响^[32]。Dai 等^[10, 33, 34]分别研究了干的和含水的辉石、瓦兹利石、橄榄石、二辉橄榄岩等样品,发现干样品电导率随着氧逸度的增加而增大;而含水矿物样品的电导率随着氧逸度增加而减小(图 5)。

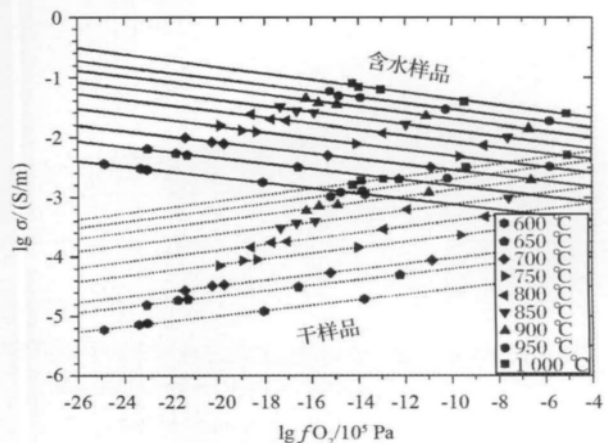


图 5 15 GPa 600 ~ 1 000 °C 下干的和含水 (0.0456%) 瓦兹利石电导率与氧逸度关系^[36]

Fig. 5 The relationship between Oxygen fugacity and electrical conductivity of “dry” and “wet” (water content 0.0456%) wadsleyite under the condition of 15 GPa and 600 ~ 1 000 °C^[36]

Dai 等^[25]认为对于干样品,小极化子导电机制起主要作用,随着氧逸度增加, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 之间的氧化还原反应速率加快、程度加深,载流子的浓度增加且迁移活化焓减小,电导率随之增大;对于含水的矿物样品,样品的导电机制为质子导电,氧逸度的升高将阻碍质子的传导。而 Yoshino 等^[35]认为,在较低温度时,其结果与 Dai 等的相同;但当 $T > 727\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其测量结果并不能完全用样品中存在的质子导电给予合理的解释。

1.6 部分熔融

部分熔融可以使矿物岩石的电导率升高,早在 1977 年 Shankland 等^[37]就提出熔融物质可以使矿物颗粒边界形成互相联通的网络,这可以使电导率提高 2 个数量级。由此可能造成下地壳和上地幔的电导率异常。Liu 等^[38]研究取得了花岗岩、玄武岩和辉橄岩 3 种岩石电导率,认为部分熔融可能使样品电导率发生了 3 ~ 5 个量级的变化。Presnall 等^[39]在常压、700 ~ 1 600 $^{\circ}\text{C}$ 下,测量了合成的玄武岩样品的电导率,发现玄武岩部分熔融体的电导率比熔融前提高了近 1 个数量级。Yoshino 等^[40]对白云石的研究亦得到了类似结果(图 6)。

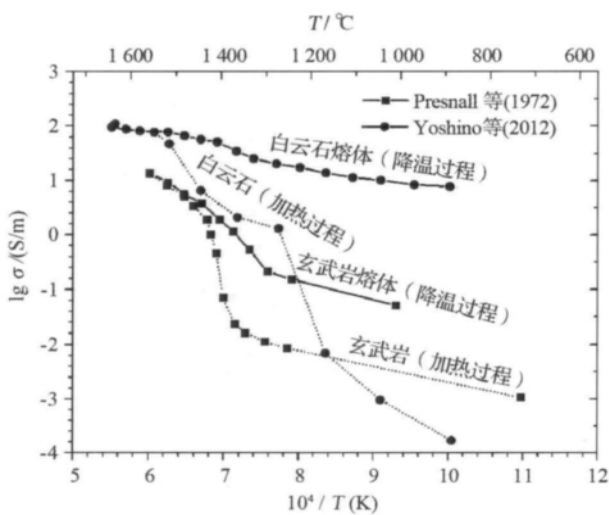


图 6 部分熔融对玄武岩和白云石样品电导率的影响^[39, 40]

Fig. 6 Effect of partial melting on the electrical conductivity of basalt and dolomite samples^[39, 40]

到目前为止,对各种影响因素的研究,大都是在固定其他参数的情况下,改变其中的 1 个或 2 个变量,得到它们与电导率的函数,并假定各参量是相互独立地改变矿物的电学性质,得到 $\sigma = f_1(C_w) \cdot f_2(X_{Fe}) \cdot f_3(f_{O_2}) \dots$ 。事实上,各个影响因素之间并不一定相互独立,很可能产生耦合效应,如氧逸度对

电导率的作用会受到铁含量的约束。因此在高温高压下,综合讨论多个变量对电导率的综合影响,得到 $\sigma = f(C_w, X_{Fe}, f_{O_2}, \dots)$, 将更有研究意义。

2 导电机制

大多数的硅酸盐矿物,随着温度的升高,逐渐由常温时的绝缘体变为高温下的半导体。对于完美的矿物晶体,所有电子都被原子核强烈地束缚而处于满带中。电子只有通过热活化作用,穿过禁带进入导带当中,才能自由移动。而完美晶体具有很宽的能隙(如石英为 8 eV),很少有电子能跨越禁带而参与导电,因此本征导电机制对电导率的贡献非常小。而在实际矿物中,由于在杂质和缺陷周围能形成许多束缚态,其能级可以存在于本征原子的禁带当中,使材料的电导率大为增强。一般情况下,样品中同时存在着多种点缺陷,不同的缺陷类型对应着特定的导电机制,主要有:离子、质子(H^+)、小极化子和大极化子导电。

2.1 离子

离子导电通常通过产生阳离子空穴而实现,其微观机制为“载流子—离子”的扩散。如在镁铁质的地幔矿物中,载流子通常为镁离子位置上的空位 V_{Mg}^{\bullet} (图 7)。

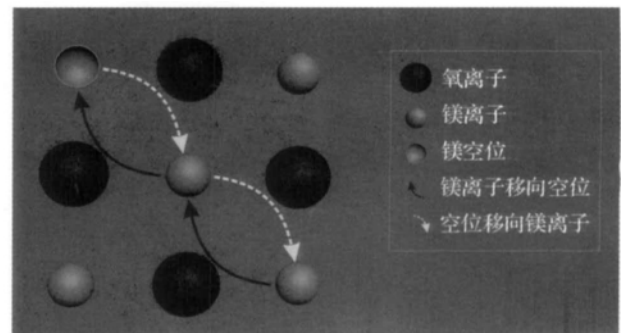


图 7 通过镁空位传输的离子导电机制示意图

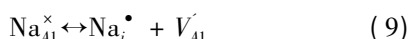
(改绘自文献[7])

Fig. 7 Diagram of the ionic conduction by migration of vacancies of magnesium site (modified from reference [7])

在这种导电机制中,铁、镁离子需要同时发生移动,其载流子运输的能垒很高,活化能亦很高。因此,铁镁矿物只有在很高的温度下才需考虑离子导电机制^[7]。

Ni 等^[41]和 Hu 等^[42]分别测量了无水钠长石玻璃和天然钠长石样品的电导率,发现其主要导电机制为离子导电,主要通过钠离子的迁移实现,存在如

下“点缺陷”反应:



上式采用 Kroger-Vink 记法, \times 表示有效电荷为 0, \bullet 和 \cdot 分别表示一个单位的正和负有效电荷。其中 $\text{Na}_{\text{Al}}^{\times}$ 为在正常晶格位置上的钠离子, Na_i^{\bullet} 为占据在晶格间隙处的钠离子, V_{Al}^{\cdot} 为正常钠离子晶格位置的空位。高温下, 正常位置的钠离子可以获得足够的能量穿越能垒进入晶格间隙。随着压力的增加, 碱性长石的电导率降低, 这可能是由于压力的作用, 使 $\text{Na}_{\text{Al}}^{\times}$ 晶格间隙缩小, 活化焓增加, 电导率降低^[43]。

2.2 质子

质子导电本质上是一种离子导电机制, 但是由于质子要比其他离子小很多, 是唯一可能在固体中具有高度流动性的离子。对于地幔中的名义无水矿物, 水常以羟基的形式存在于矿物晶格的本征缺陷中参与导电^[44]。该导电过程中, 电荷通过质子在点缺陷之间的跃迁得以传输, 传输过程与其中的水含量密切相关, 指前因子常常随着水含量的增加而增大, 且电导率与水含量的关系应符合 Nernst-Einstein 方程。

Xu 等^[45] 报道了瓦兹利石、林伍德石和橄榄石的电导率测量结果, 认为小极化子导电为其主要导电机制, 但 Huang 等^[15] 指出, 由于 Xu 等的样品中存在水, 其主要导电机制应该为质子导电。Yoshino 等^[46, 47] 对含水和不含水的橄榄石电导率进行了研究, 发现在低温时电导率随着水含量增加而升高, 表明在低温时主要为质子导电; 在高温时电导率却不随水含量而改变, 此时应为小极化子导电。他们认为, 含水地幔矿物的电导率主要受质子 (H^+) 和小极化子影响, 可以表达为:

$$\sigma = \sigma_{0\text{H}^+} \exp\left(-\frac{H_{a\text{H}^+}}{kT}\right) + \sigma_{0\text{P}^{\ominus}} \exp\left(-\frac{H_{a\text{P}^{\ominus}}}{kT}\right) \quad (9)$$

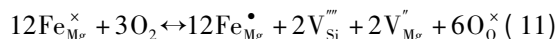
式中: σ_0 为指前因子, H_a 为活化焓, 下标 H^+ 和 P^{\ominus} 分别代表质子导电和小极化子导电。

从微观上考虑, 由于质子导电机制中的结合能很低且离子半径很小, 所以载流子传输的能垒相对较低, 且其活化能常常小于 1 eV, 在低温时质子导电通常为主要的导电机制。

2.3 小极化子

在离子晶体中, 当有额外的电荷位于阳离子晶格中时 (如 M^{3+} 位于 M^{2+} 中时), 由于静电作用, 周围离子的平衡状态将会发生改变, 使晶格发生形变, 载流子和相应的晶格诱发形变便形成了极化子^[48]。晶格形变产生的势能可以将载流子捕获, 如果形变

延伸距离小于晶格参数或与之差不多, 则称为小极化子。小极化子导电通常通过不同价态的相邻离子间的电荷迁移而进行。在许多镁铁质矿物中, 小极化子通常是由如下点缺陷氧化还原反应形成:



式中: $\text{Fe}_{\text{Mg}}^{\times}$ 和 $\text{Fe}_{\text{Mg}}^{\bullet}$ 分别为晶格镁离子位置上的二价和三价铁离子, O_0^{\times} 为晶格氧离子, V_{Si}^{m} 和 V_{Mg}^{v} 为晶格硅离子和晶格镁离子空位。 $\text{Fe}_{\text{Mg}}^{\bullet}$ 称为小极化子, 等效于束缚在 $\text{Fe}_{\text{Mg}}^{\times}$ 上的空穴 h^{\bullet} , 小极化子导电机制实际是指小极化子 $\text{Fe}_{\text{Mg}}^{\bullet}$ (等效空穴 h^{\bullet}) 的定向跃迁 (图 8)^[7]。跃迁过程可以表示为:

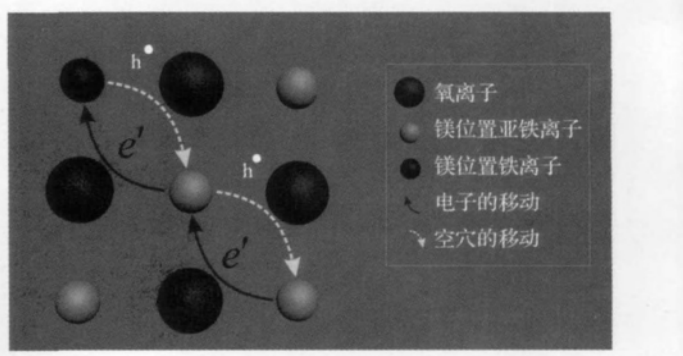
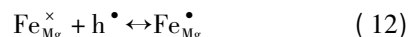


图 8 通过镁位置上亚铁离子和铁离子之间跃迁进行电荷传输的小极化子导电机制示意图 (改绘自文献 [7])
Fig. 8 Diagram of small polaron conduction mechanism that electrical charge transfers by the ferro and ferric hopping of Mg crystal lattice (modified from reference [7])

如果仅仅是电子空穴在晶体中移动, 则其传输的能垒将会很低。事实上, 空穴的出现将会明显改变离子晶体的局部结构 (图 9)。 $\text{Fe}_{\text{Mg}}^{\bullet}$ 中存在的额外正电荷, 会对其周围的阳离子 (阴离子) 产生一个附加的斥力 (引力)^[7]。

小极化子导电是地幔含铁矿物 (如橄榄石、辉石等) 最主要的导电机制^[49], 其电导率与载流子的数目 (N) 及其迁移率 (μ) 成正比^[28], 如在含铁硅酸盐中, 载流子的数目 N 与 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ (记作 s) 和 Fe 的原子百分数 X_{Fe} 成正比: $N \propto sX_{\text{Fe}}$; 则小极化子的迁移率为:

$$\mu = \frac{\mu_0}{T} \exp\left(-\frac{\Delta E_0 + P\Delta V}{kT}\right) \quad (13)$$

又由于 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 是由氧逸度控制的, 所以电导率 (σ) 通常可以写成 X_{Fe} 和氧逸度的函数:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{T} X_{\text{Fe}}^n f_{\text{O}_2} \exp\left(-\frac{\Delta E_0 + P\Delta V}{kT}\right) \quad (14)$$

因此控制小极化子导电机制的主要因素是: 氧逸度和矿物中的铁含量。一方面, 随着氧逸度的升高, $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ 逐渐升高; 另一方面, 铁含量的升高能使载流子的浓度随之增大。

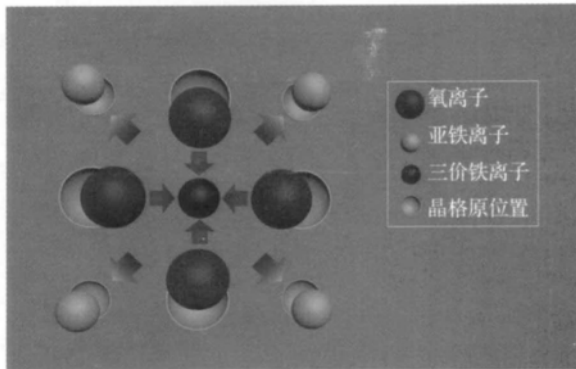


图 9 小极化子示意图^[7]

Fig. 9 The diagram of small polaron conduction mechanism^[7]

2.4 大极化子

大极化子是由电子载流子与固体中的离子之间的长程库伦作用而发生的电子-晶格反应所形成的^[48]。相比于由短程作用产生的小极化子, 大极化子引起的晶格形变很大, 使其迁移的能垒很高, 活化能也更大。

目前, 还没有发现硅酸盐的大极化子导电机制, 但有研究者发现在高温下, 方镁石的主要导电机制为大极化子导电。Dobson 等^[50, 51]在高温高压对方镁铁矿进行电导率测量时发现其存在 2 种不同的非本征导电机制, 在低温时其导电规律与小极化子导电模型一致, 而在高温区, 其电导率对铁含量变化并不敏感, 其主要导电机制应为大极化子导电。

矿物的导电往往是多种机制贡献的叠加, 只是它们所起作用的大小不同而已。且随着矿物成分和所处温压条件不同, 其主要导电机制也可能发生改变。在矿物电导率的实验研究中, 分析其导电机制的动态变化, 并给予合理解释, 有助于更加深入地理解矿物导电的本质。

3 地壳典型造岩矿物电导率研究的新进展

由于地壳矿物岩石所处的温压条件较低, 对于地壳的主要造岩矿物长石、石英、辉石、角闪石^[52]等的电导率研究, 已取得了诸多的成果。

3.1 长石

长石是地壳分布最为广泛的重要造岩矿物, 对其电导率进行研究具有重要意义。由于实验条件的限制, 最早人们利用直流法在常压下测量长石的电导率, 在升温过程中发现电导率会随着矿物的熔融而产生突变^[53, 54]。随着高压技术的发展, 对碱性长石的阻抗谱研究表明, 其导电过程为钾、钠离子在电场作用下的间隙迁移, 属于离子导电机制。Hu 等^[42]测量了化学成分不同的样品, 发现碱性长石固溶体的电导率随着钠离子含量的增加而增大。且其活化焓随着 $(Na^+ / (Na^+ + K^+))$ 值增加而降低^[55, 56]。

含水长石通常比干的长石电导率高, 这可能有 2 个方面的原因: 一是水的存在, 可以提高载流子 (Na^+) 的迁移率; 其次由于含水而形成的质子导电机制, 也将提高矿物的电导率^[41]。这种由于长石含水而引起的电导率异常, 或许可以解释下地壳的异常高导^[57]。前人的相关研究结果如图 10 和表 1 所示。

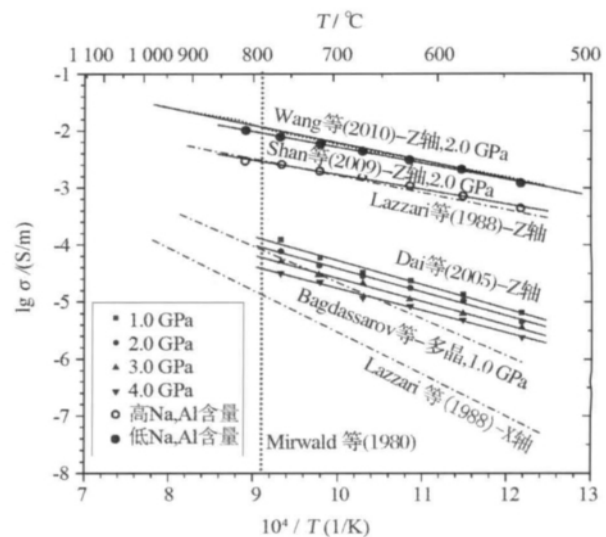


图 10 长石的电导率数据对比^[41, 42, 54, 58-60]

Fig. 10 Comparison of electrical conductivity studies of feldspar^[41, 42, 54, 58-60]

高温高压下长石电导率的实验研究已取得了诸多进展, 但仍有许多工作需进一步展开。如高温高压下单晶长石电导率各向异性的实验研究, 以及结构水对长石电导率的影响等, 目前尚少有报道。

3.2 石英

石英是地壳分布最为广泛的矿物之一, 获得石英的电导率信息是了解地壳电导率分布的重要基

表 1 长石电导率研究的样品、实验条件、测量方法和实验结果

Table 1 Overview of the samples, experimental conditions, methods of measurement and results of study on electrical conductivity of feldspar

实验样品	P/GPa	$T/^\circ\text{C}$	测量方法	$\Delta U / \text{eV}$	参考文献
钾、钠长石固溶体	1.0	500 ~ 800	交流阻抗谱法	0.82 ± 0.04	[44]
长石玻璃	1.8	300 ~ 800	交流阻抗谱法	0.84 ± 0.01	[41]
长石玻璃	3.0/4.0	800 ~ 1 500	交流阻抗谱法	0.98 ± 0.05	[59]
Amelia 长石	常压	1 080 ~ 1 111	直流法	-	[48]
天然/合成钠长石	常压	400 ~ 900	交流阻抗谱法	$0.86/0.72$	[60]
钠长石 ($\text{An}_3\text{Ab}_{97}$)	0.28	1 300	直流法	-	[54]

础。早在 1952 年,就有人对石英进行电导率测量^[53, 61],并提出了石英中离子导电的理论模型;之后利用实验数据对该模型进行了改进^[62, 63]。研究发现石英存在各向异性,对合成水晶样品进行阻抗谱测量,得到电导率的各向异性度最高可达 10^4 ,但各向异性度随着温度的升高而降低^[64]。

合成水晶的 α 到 β 相变对电导率的影响很小,但是温度对电导率的影响很大。随着温度的升高,电导率升高,且导电机制亦会发生改变。在高温段中,载流子是活化焓较小的碱离子,而在低温窄缝通道内,电导率主要由活化焓较大的额外出现的未缔合铝离子决定(图 11)^[64]。随压力升高, Z 轴水晶电导率降低^[65],且其电导率对杂质离子很敏感,单双明等^[66]在 2.0 GPa 和 550 ~ 850 $^\circ\text{C}$ 的条件下研究

发现,水晶中杂质离子 Na^+ , Al^{3+} 的含量对电导率的影响很大,且两者呈正相关关系。

3.3 辉石

地球物理和地球化学研究表明,在深度为 20 ~ 40 km 的下地壳底部,主要物质为铁镁质的麻粒岩,而辉石是其重要组成矿物。此外,辉石还是上地幔主要的组成矿物。对辉石电导率的影响因素和导电机制已经有了较为深入的研究,并取得了许多成果(图 12)。

斜方辉石的电导率与其中的 Al^{3+} 和 Cr^{3+} 离子浓度密切相关,随着离子浓度的升高,电导率增大^[69]。对单斜辉石多晶和单晶样品的电导率研究表明,晶粒的大小对电导率没有影响。而在不同的晶轴方向,电导率却存在着很大的差别^[70, 71]。利用实验数据, Huebner 等^[69]建立起了沿不同晶轴方向上透辉石 $\lg \sigma$ 与 $\lg f_{\text{O}_2}$ 的关系模型。对斜方辉石、单斜辉石以及钛铁矿和石榴子石组合之间的相变研究发现,斜方辉石的电导率比橄榄石高,当斜方辉石转变成单斜辉石时,其电导率降低了 0.7 个对数单位,而当单斜辉石相变成钛铁矿和石榴子石组合时,其电导率又升高了 0.7 个对数单位^[72]。

代立东等^[73, 74]认为,干的辉石样品主要导电机制为小极化子导电,随着氧逸度的升高,其电导率不断增大。对含水单斜辉石的研究表明,含水矿物的活化焓几乎与水含量无关,但干样品的活化焓(1.50 eV)要比含水样品(0.73 eV)高得多,这可能是样品导电机制由小极化子导电变为质子导电所致^[5]。但电导率并非与质子浓度存在简单的指数关系,而是铁含量、水含量、杂质离子浓度、晶轴方向等的复杂函数^[75]。

除上述 3 种主要矿物外,对角闪石和方解石等碳酸盐矿物也有不少报道。Wang 等^[81]对含水角闪石的研究表明,脱水作用可能使样品中的铁离子氧

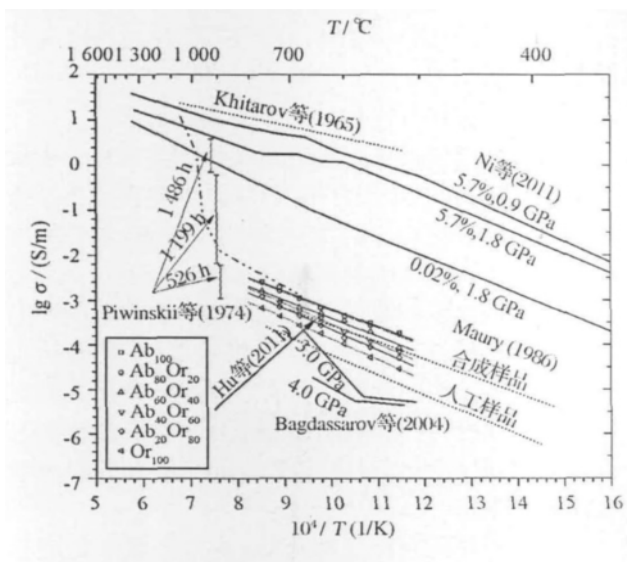


图 11 石英电导率研究对比^[59, 63, 65-68]

Fig. 11 Comparison of electrical conductivity for quartz at high pressure^[59, 63, 65-68]

图中灰色竖线代表水晶在 1.0 GPa 时 α - β 相变温度 $T = 826^\circ\text{C}$
The grey dashed lines show the temperature $T = 826^\circ\text{C}$, where the transition from alpha to beta quartz occurs at 1.0 GPa

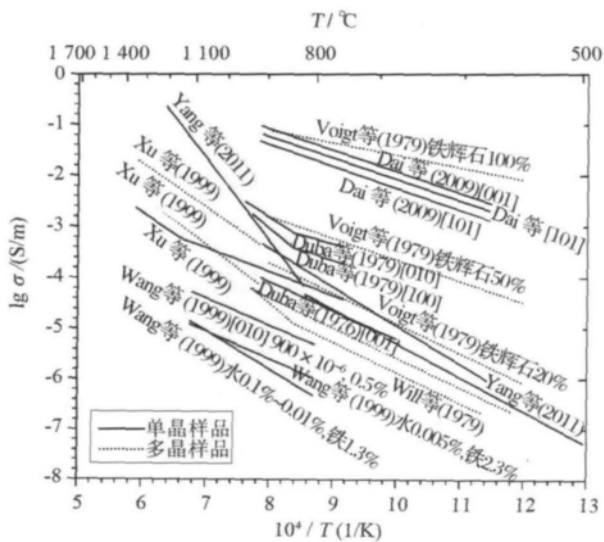


图 12 辉石单晶和多晶电导率研究回顾^[71 72 74 76 ~ 80]

Fig. 12 Electrical conductivities of pyroxene single crystals and polycrystalline materials^[71 72 74 76 ~ 80]

方括号中数字代表单晶样品的晶向,以%的形式标注了样品中的水和铁的质量百分含量,其中0.1%~0.01%分别表示试验初始和试验后的水含量

The crystallographic orientation is indicated in square brackets.

Water and Fe contents are given in % (weight), the 0.1%~0.01% means water content varied from 0.1% to 0.01% during the initial and final of the experiment

化(Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+}),导致矿物的电导率升高。Bagdassarov等^[82]利用电导率方法研究了方解石的相变。存在于样品中的少量碳酸盐熔融,可使矿物岩石的电导率提高几个数量级^[83]。Huang等^[84]研究了不同碳酸盐含量的橄榄岩及玄武岩样品,发现碳酸盐熔体的存在使样品的电导率得到了显著提高,认为碳酸盐熔体、硅酸盐熔体及水的共存可以更好地解释上地幔的电导率异常。对高岭石^[85]等黏土矿物的电导率研究在土壤学、电测井等领域得到了广泛应用^[86]。

高温高压下对地壳物质的电导率研究,主要集中在对中下地壳高导层(High Conductivity Zone, HCZ)成因的解析上。目前,对于下地壳高导层成因提出的主要模型有:①颗粒边界石墨膜模型:石墨或者非晶质的固体碳都能使岩石的电导率变高,即使极少量的碳,一旦相互连通,就可以使电导率提高到与HCZ相当的数量级^[87];②部分熔融模型:在足够高的温度下,地壳矿物可能会发生部分熔融,导致电导率提高几个数量级^[88];③孔隙流体模型和高导的次生矿物模型:由于地壳矿物岩石中存在着大量

的孔隙和裂隙,其间常常被电解质流体和高导性次要矿物部分或全部地填充^[89];④含水矿物模型:矿物中所含的少量水便可以使其电导率提高几个数量级;⑤正空穴电子对 PHPs (Positive Hole Paris) 模型^[90]。

Jones^[91]指出,对于地壳高导层的成因,人们不应该陷入寻找单一的导致下地壳电导率增加的原因,虽然目前已经提出了很多的解释,但是它们在不同的构造环境和不同的深度所起的影响并不相同。

4 存在的问题和需要进一步深入开展的研究

近年来,随着实验设备的更新和实验方法的改进,高温高压下电导率的实验研究,已经取得了很大的进展。但是仍有许多问题亟待解决:

(1) 对地壳电学性质的研究大都集中在各主要矿物上,很少涉及不同类型的岩石。但地壳物质主要以岩石形式存在,因此对天然岩石样品的电性参数进行系统研究,得到电导率与各影响因素之间的各种定性和定量关系,具有重要意义。

(2) 对于少量存在于地壳中的副矿物电学性质的报道不多,它们的存在是否会引起整个岩石电导率的变化,目前尚不太清楚。

(3) 对于地球内部,矿物岩石存在的真实物理化学状态并不清楚,大多数的电导率研究结果还处于模型阶段。它们与地球内部真实的电结构之间可能有较大差别。

未来的工作可以从以下方面加以改进:

(1) 可以借助更先进的高温高压设备和分析检测平台,在更大的温压范围内,对更多的物理化学条件加以控制,模拟更真实的地球内部环境,对矿物岩石电导率进行更准确的测量。

(2) 多角度和宽尺度地去分析矿物岩石的导电过程。从分析岩石的结构及矿物组成、矿物的结构及晶形对电导率的影响,到研究点缺陷、杂质元素对电导率的改变,直至目前讨论原子中电子自旋状态引起的电导率变化,对电导率的研究越来越趋于微观,趋于本质。

(3) 随着研究尺度的降低,使得电导率的理论模拟计算成为了可能。原位实验测量与理论模拟计算的结合与验证,可以为认识地球物质导电的本质提供另一条重要途径。

参考文献 (References):

[1] Xu Y, McCammon C, Poe B. The effect of alumina on the electri-

- cal conductivity of silicate perovskite [J]. *Science*, 1998, 282: 922-924.
- [2] Zhang B, Katsura T, Shatskiy A, et al. Electrical conductivity of FeTiO₃ ilmenite at high temperature and high pressure [J]. *Physical Review B*, 2006, 73: 134104.
- [3] Poe B, Romano C, Nestola F, et al. Electrical conductivity anisotropy of dry and hydrous olivine at 8 GPa [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2010, 181: 103-111.
- [4] Wu X, Zhang B, Xu J, et al. Electrical conductivity measurements of periclase under high pressure and high temperature [J]. *Physica B*, 2010, 405: 53-56.
- [5] Yang X, Keppler H, McCammon C, et al. Effect of water on the electrical conductivity of lower crustal clinopyroxene [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: B04208.
- [6] Huang Xiaogang, Huang Xiaoge, Bai Wuming. Progress of high temperature and high pressure experimental study on the electrical conductivity of the minerals and rocks [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25: 1 247-1 258.
- [7] Yoshino T. Laboratory electrical conductivity measurement of mantle minerals [J]. *Surveys in Geophysics*, 2010, 31: 163-206.
- [8] Nover G. Electrical properties of crustal and mantle rocks—A review of laboratory measurements and their explanation [J]. *Surveys in Geophysics*, 2005, 26: 593-651.
- [9] Duba A, Constable S. The electrical conductivity of Lherzolite [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 11 885-11 899.
- [10] Dai L, Li H, Liu C, et al. Experimental study on the electrical conductivity of orthopyroxene at high temperature and high pressure under different oxygen fugacities [J]. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, 2005, 79: 803-809.
- [11] Dai L, Li H, Liu C, et al. Experimental measurement of the electrical conductivity of single crystal olivine at high temperature and high pressure under different oxygen fugacities [J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16: 387-393.
- [12] Li Peng, Zhou Wen'ge, Gong Chaoying, et al. Electrical conductivity of two-pyroxene granulite under high pressure in northern margin of North China craton [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53: 2 386-2 395.
- [13] Maumus J, Bagdassarov N, Schmeling H. Electrical conductivity and partial melting of mafic rocks under pressure [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69: 4 703-4 718.
- [14] Bagdassarov N, Maumus J, Poe B, et al. Pressure dependence of T_g in silicate glasses from electrical impedance measurements [J]. *Physics and Chemistry of Glasses*, 2004, 45: 197-214.
- [15] Huang X, Xu Y, Karato S. Water content in the transition zone from electrical conductivity of wadsleyite and ringwoodite [J]. *Nature*, 2005, 434: 746-749.
- [16] Shimojuku A, Yoshino T, Yamazaki D, et al. Electrical conductivity of fluid-bearing quartzite under lower crustal conditions [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 198/199: 1-8.
- [17] Gaillard F. Laboratory measurements of electrical conductivity of hydrous and dry silicic melts under pressure [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 218: 215-228.
- [18] Pommier A, Gaillard F, Pichavant M, et al. Laboratory measurements of electrical conductivities of hydrous and dry Mount Vesuvius melts under pressure [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: B05205.
- [19] Karato S. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle [J]. *Nature*, 1990, 347: 272-273.
- [20] Wang D, Mookherjee M, Xu Y, et al. The effect of water on the electrical conductivity of olivine [J]. *Nature*, 2006, 443: 977-980.
- [21] Huang Xiaoge, Bai Wuming, Xu Yousheng, et al. Influence of hydrogen on electrical conductivity of wadsleyite and ringwoodite with its geodynamics implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21: 1 743-1 748.
- [22] Yoshino T, Matsuzaki T, Shatskiy A, et al. The effect of water on the electrical conductivity of olivine aggregates and its implications for the electrical structure of the upper mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288: 291-300.
- [23] Huang X, Xu Y, Karato S. The effects of hydrogen on electrical conductivity in wadsleyite and ringwoodite: Implications for hydrogen content in the mantle transition zone [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 2004 85(Suppl.): 47.
- [24] Huang X, Xu Y, Karato S. Earth science: A wet mantle conductor? (reply) [J]. *Nature*, 2006, 439: E3-E4.
- [25] Dai L, Karato S. Electrical conductivity of wadsleyite at high temperatures and high pressures [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 287: 277-283.
- [26] Manthilake M, Matsuzaki T, Yoshino T, et al. Electrical conductivity of wadsleyite as a function of temperature and water content [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 174: 10-18.
- [27] Zhu Maoxu, Xie Hongsen, Guo Jie, et al. Electrical conductivity measurement of serpentinite at high temperature and pressure [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 20: 1 903-1 907.
- [28] Yoshino T, Shimojuku A, Shan S, et al. Effect of temperature, pressure and iron content on the electrical conductivity of olivine and its high-pressure polymorphs [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: B08205.
- [29] Karato S. *Physics and Chemistry of the Deep Earth* [M]. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2013.
- [30] Hirsch L, Shankland T, Duba A. Electrical conduction and polaron mobility in Fe-bearing olivine [J]. *Geophysical Journal International*, 1993, 114: 36-44.
- [31] Yoshino T, Katsura T. Effect of iron content on electrical conductivity of ringwoodite, with implications for electrical structure in the transition zone [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 174: 3-9.
- [32] Li H, Xie H, Guo J, et al. In situ control of oxygen fugacity at high temperature and high pressure [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 29 439-29 451.
- [33] Dai L, Li H, Deng H, et al. In-situ control of different oxygen

- fugacity experimental study on the electrical conductivity of lherzolite at high temperature and high pressure [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2008, 69: 101-110.
- [34] Dai L, Li H, Hu H, *et al.* Experimental study of grain boundary electrical conductivities of dry synthetic peridotite under high-temperature, high-pressure, and different oxygen fugacity conditions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: B12211.
- [35] Yoshino T, Katsura T. Re-evaluation of electrical conductivity of anhydrous and hydrous wadsleyite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 337/338: 56-67.
- [36] Dai L, Li H, Hu H, *et al.* The effect of chemical composition and oxygen fugacity on the electrical conductivity of dry and hydrous garnet at high temperatures and pressures [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2012, 163: 689-700.
- [37] Shankland T, Waff H. Partial melting and electrical conductivity anomalies in the upper mantle [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82: 5 409-5 417.
- [38] Liu Jianglin, Bai Wuming, Kong Xiangru, *et al.* Electrical conductivity of granite, basalt and pyroxene peridotite under high temperature high pressure conditions [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44: 528-533.
- [39] Presnall C, Simmons L, Porath H. Changes in electrical conductivity of a synthetic basalt during melting [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77: 5 665-5 672.
- [40] Yoshino T, McIsaac E, Laumonier M, *et al.* Electrical conductivity of partial molten carbonate peridotite [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 194: 1-9.
- [41] Ni H, Keppler H, Manthilake M, *et al.* Electrical conductivity of dry and hydrous NaAlSi₃O₈ glasses and liquids at high pressures [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2011, 162: 501-513.
- [42] Hu H, Li H, Dai L, *et al.* Electrical conductivity of albite at high temperatures and high pressures [J]. *American Mineralogist*, 2011, 96: 1 821-1 827.
- [43] Jones A, Palmer D, Islam M, *et al.* Alkali ion migration in albite and K-feldspar [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2004, 31: 313-320.
- [44] Bolfan-Casanova N, Keppler H, Rubie D. Water partitioning between nominally anhydrous minerals in the MgO-SiO₂-H₂O system up to 24 GPa: Implications for the distribution of water in the Earth's mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 182: 209-221.
- [45] Xu Y, Poe B, Shankland T, *et al.* Electrical conductivity of olivine, wadsleyite, and ringwoodite under upper-mantle conditions [J]. *Science*, 1998, 280: 1 415-1 418.
- [46] Yoshino T, Manthilake G, Matsuzaki T, *et al.* Dry mantle transition zone inferred from the conductivity of wadsleyite and ringwoodite [J]. *Nature*, 2008, 451: 326-329.
- [47] Yoshino T, Matsuzaki T, Yamashita S, *et al.* Hydrous olivine unable to account for conductivity anomaly at the top of the asthenosphere [J]. *Nature*, 2006, 443: 973-976.
- [48] Goddat A, Peyronneau J, Poirier J. Dependence on pressure of conduction by hopping of small polarons in minerals of the Earth's lower mantle [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1999, 27: 81-87.
- [49] Xu Yousheng. A review on the electrical conductivity of mantle minerals and rocks [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7: 229-237. [徐有生. 地幔矿物岩石的电导率研究进展 [J]. 地学前缘, 2000, 7: 229-237.]
- [50] Dobson D, Richmond N, Brodholt J. A high-temperature electrical conduction mechanism in the lower mantle phase (Mg, Fe)_{1-x}O [J]. *Science*, 1997, 275: 1 779-1 781.
- [51] Dobson D, Brodholt J. The electrical conductivity of the lower mantle phase magnesiowüstite at high temperatures and pressures [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 531-538.
- [52] Zhou W, Fan D, Liu Y, *et al.* Measurements of wave velocity and electrical conductivity of an amphibolite from southwestern margin of the Tarim Basin at pressures to 1.0 GPa and temperatures to 700 °C: Comparison with field observations [J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 187: 1 393-1 404.
- [53] Noritomi K. Studies on the change of electrical conductivity with temperature of a few silicate minerals [J]. *Science Reports of the Tohoku University (Series 5)*, 1954, 6: 119-126.
- [54] Khitarov N, Slutskiy A. The effect of pressure on the melting temperatures of albite and basalt (based on electroconductivity measurements) [J]. *Geochemistry International*, 1965, 2: 1 034-1 042.
- [55] Hu Haiying, Li Heping, Dai Lidong, *et al.* Experimental study on impedance spectra of microcline under high temperature and high pressure [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2011, 40: 284-289. [胡海英, 李和平, 代立东, 等. 高温高压下微斜长石的阻抗谱实验研究 [J]. 人工晶体学报, 2011, 40: 284-289.]
- [56] Hu Haiying, Li Heping, Dai Lidong, *et al.* Experimental study on impedance spectra of albite at high temperatures and high pressures [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26: 382-388. [胡海英, 李和平, 代立东, 等. 高温高压下钠长石的阻抗谱实验研究 [J]. 高压物理学报, 2012, 26: 382-388.]
- [57] Yang X, Keppler H, McCammon C, *et al.* Electrical conductivity of orthopyroxene and plagioclase in the lower crust [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2012, 163: 33-48.
- [58] Piwinski A, Duba A. High temperature electrical conductivity of albite [J]. *Geophysical Research Letters*, 1974, 1: 209-211.
- [59] Bagdassarov N, Delépine N. α - β inversion in quartz from low frequency electrical impedance spectroscopy [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2004, 65: 1 517-1 526.
- [60] Mayury F. Conductibilité électrique des tectosilicates. I. Méthode et résultats expérimentaux Cristallographie [J]. *Bulletin de la Société Française de Mineralogie et*, 1968, 91: 267-278.
- [61] Calleja M, Dove M, Salje E. Anisotropic ionic transport in quartz: The effect of twin boundaries [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2001, 13: 9 445-9 454.
- [62] Jain H, Nowick A. Electrical conductivity of synthetic and natural quartz crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, 53:

- 477-484.
- [63] Lazzari S, Martini M, Paleari A, *et al.* DC and AC ionic conductivity in quartz: A new high temperature mechanism and a general assessment [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1988, 32: 299-302.
- [64] Wang D, Li H, Yi L, *et al.* Anisotropy of synthetic quartz electrical conductivity at high pressure and temperature [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115, B09211, doi: 10.1029/2009JB00695.
- [65] Dai Lidong, Li Heping, Shan Shuangming, *et al.* Experimental study on electrical conductivity of Z-axis quartz crystal under high temperature and high pressure [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2005, 34: 403-407. [代立东, 李和平, 单双明, 等. 高温高压下 Z 轴水晶的电导率实验研究 [J]. *人工晶体学报*, 2005, 34: 403-407.]
- [66] Shan Shuangming, Li Heping, Dai Lidong, *et al.* Influence of ionic impurities on the electrical conductivity of synthetic quartz crystals at high temperature and high pressure [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29: 109-112. [单双明, 李和平, 代立东, 等. 高温高压下杂质离子对水晶电导率影响的实验研究 [J]. *矿物学报*, 2009, 29: 109-112.]
- [67] Wang D, Li H, Liu C, *et al.* Electrical conductivity of synthetic quartz crystals at high temperature and pressure from complex impedance measurements [J]. *Chinese Physics Letters*, 2002, 19: 1 211-1 213.
- [68] Mirwald P, Massonne H. The low-high quartz and quartz-coesite transition to 40 kbar between 600 and 1 600 °C and some reconnaissance data on the effect of NaAlO₂ component on the low quartz-coesite transition [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85: 6 983-6 990.
- [69] Huebner J, Voigt D. Electrical conductivity of diopside: Evidence for oxygen vacancies [J]. *American Mineralogist*, 1988, 73: 1 235-1 254.
- [70] Duba A, Boland J, Ringwood A. The electrical conductivity of pyroxene [J]. *The Journal of Geology*, 1973, 81: 727-735.
- [71] Yang X, Heidelbach F. Grain size effect on the electrical conductivity of clinopyroxene [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2011, 163: 939-947.
- [72] Xu Y, Shankland T. Electrical conductivity of orthopyroxene and its high pressure phases [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 2 645-2 648.
- [73] Dai Lidong, Li Heping, Liu Congqiang, *et al.* The electrical conductivity of pyroxenite at high temperature and high pressure [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2005, 25: 303-306. [代立东, 李和平, 刘丛强, 等. 高温高压下辉石岩的电导率实验研究 [J]. *矿物学报*, 2005, 25: 303-306.]
- [74] Dai L, Karato S. Electrical conductivity of orthopyroxene: Implications for the water content of the asthenosphere [J]. *Proceedings of the Japan Academy (Series B)*, 2009, 85: 466-475.
- [75] Schlechter E, Stalder R, Behrens H. Electrical conductivity of H-bearing orthopyroxene single crystals measured with impedance spectroscopy [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2012, 39: 531-541.
- [76] Voigt R, Seifert K, Will G. Die elektrische leitfähigkeit von pyroxenen der reihe MgSiO₃-FeSiO₃ bei 10 and 20 kbar unter definierten thermodynamischen Bedingungen [J]. *Neues Jahrbuch für Mineralogical Monatsch*, 1979, 7: 308.
- [77] Will G, Cemiè L, Hinze E, *et al.* Electrical conductivity measurements on olivines and pyroxenes under defined thermodynamic activities as a function of temperature and pressure [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1979, 4: 189-197.
- [78] Wang Z, Ji S, Dresen G. Hydrogen-enhanced electrical conductivity of diopside crystals [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 799-802.
- [79] Duba A, Heard H, Schock R. Electrical conductivity of orthopyroxene to 1 400 °C and the resulting selenotherm [C] // *Proceedings in the 7th Lunar Science Conference*. New York, 1976: 3 173-3 181.
- [80] Duba A, Dennison M, Irving A, *et al.* Electrical conductivity of aluminous orthopyroxene [J]. *Lunar and Planetary Science*, 1979, 10: 318-319.
- [81] Wang D, Guo Y, Yu Y, *et al.* Electrical conductivity of amphibole-bearing rocks: Influence of dehydration [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2012, 164: 17-25.
- [82] Bagdassarov N, Slutskii A. Phase transformations in calcite from electrical impedance measurements [J]. *Phase Transitions*, 2003, 76: 1 015-1 028.
- [83] Gaillard F, Malki M, Iacono-Marziano G, *et al.* Carbonatite melts and electrical conductivity in the asthenosphere [J]. *Science*, 2008, 322: 1 363-1 365.
- [84] Huang Xiaogang, Huang Xiaoge, Bai Wuming. Study on the electrical conductivity of carbonated peridotite [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55: 3 144-3 151.
- [85] Lee J, Shang J. Influencing factors on electrical conductivity of compacted kaolin clay [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2001, 26: 131-151.
- [86] Revil A, Glover P. Nature of surface electrical conductivity sandstones, and clays [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25: 691-694.
- [87] Yang X. Origin of high electrical conductivity in the lowercontinental crust: A review [J]. *Surveys in Geophysics*, 2011, 32: 875-903.
- [88] Sato H, Ida Y. Low frequency electrical impedance of partially molten gabbro: The effect of melt geometry on electrical properties [J]. *Tectonophysics*, 1984, 107: 105-134.
- [89] Shankland T, Duba A, Mathez E, *et al.* Increase of electrical conductivity with pressure as an indicator of conduction through a solid phase in midcrustal rocks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 14 741-14 750.
- [90] Yang Xiaozhi, Xia Qunke, Yu Huimin, *et al.* The possible effect of hydrogen on the high electrical conductivity in the lower continental crust [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21: 31-38. [杨晓志, 夏群科, 于慧敏, 等. 大陆下地壳高电导率的起源: 矿物中的结构水 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21: 31-38.]

[91] Jones A. Continental Lower Crust [M]. Amsterdam: Elsevier

Science, 1992.

Influential Factors and Conduction Mechanisms of the In-situ Electrical Conductivity Measurements of Earth's Interior Materials: A Case Study on Crustal Minerals

Jiang Jianjun^{1 2}, Dai Lidong¹, Li Heping¹, Shan Shuangming¹,
Hu Haiying¹, Hui Keshi^{1 2}

(1. Laboratory for High Temperature and High Pressure Study of the Earth's Interior,
Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In-situ experimental measurements of the electrical conductivities of minerals and rocks under high temperature and high pressure are the important approaches to explore the chemical composition and evolution process of materials in Earth's interior, as well as to interpret the inversion results of the magnetotelluric and geomagnetic deep sounding data. In this paper, above all, some crucial influence factors on the electrical properties of mineral and rock such as temperature, pressure, water content, iron content, oxygen fugacity and melting are described in detail. Secondly, four typical kinds of electrical conduction mechanisms of minerals and rocks are demonstrated (*e. g.* ion, proton, small polaron and large polaron) at high temperature and high pressure. Finally, conduction mechanisms and geophysical applications are discussed based on the recent research results of electrical conductivities for feldspar, quartz and pyroxene on the major rock-bearing minerals in the crust, and the present problems and future research work are discussed.

Key words: Mineral and rock; Electrical conductivity; Influential factors; Conduction mechanism; High temperature and high pressure.