文章编号：1000-5773(2012)04-0382-07

高温高压下钠长石的阻抗谱实验研究*

胡海英[1,2]，李和平[1]，代立东[1,3]，单双明[1]，朱成明[1]

(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. 中国科学院研究生院，北京 100039；
3. Department of Earth and Planetary Sciences，Tokyo Institute of Technology，Tokyo 152-8551，Japan)

摘要：在压力为1.0、2.0 GPa和温度为673～973 K条件下，采用交流阻抗谱法在YJ-3000t紧装式六面顶高压设备上原位测量了钠长石的电导率。实验结果表明：在实验的温度和压力范围内，钠长石的电导率在$10^{-3.0}$～$10^{-5.5}$ S/m变化；钠长石复阻抗的模和相角对频率有很强的依赖性；随着温度T升高，钠长石的电阻率迅速减小，电导率σ增大，并且$\lg\sigma$与T^{-1}之间符合Arrhenius关系；在实验压力范围内，随着压力升高，钠长石的电导率降低。采用离子导电机制，对高温高压下钠长石的导电行为进行了合理解释。

关键词：钠长石；高温高压；阻抗谱；电导率

中图分类号：O521.2；P589.1　　**文献标识码**：A

1 引　言

电导率测量是认识和理解行星内部的重要方法之一，而矿物岩石的电导率测量则能帮助解析大地电磁测量结果，获得有关地球内部各种矿物的物理性质[1]。另外，利用矿物岩石的电导率还可以研究岩石的结构、电子和离子的迁移过程、缺陷化学等[2]。

长石是地壳的主要矿物成分，广泛地存在于地壳的各种岩石中，约占地壳总体积的60%[3]，因此长石类矿物的电导率在很大程度上影响着整个地壳的导电特性[4-6]。钠长石作为长石矿物的端元组分之一，对其电导率的研究将有助于认识整个长石矿物的电学性质。目前已报道的钠长石电导率实验[7-11]大部分在常压高温条件下进行，高温高压下钠长石电导率的实验数据很少。

本研究在压力为1.0、2.0 GPa和温度为673～973 K的条件下，采用交流阻抗谱法在10^{-1}～10^{6} Hz频率范围内测量钠长石的电导率，通过计算活化焓和指前因子等表征钠长石电学性质的物理学参数，讨论频率、温度、压力对钠长石电导率的影响，详细探讨钠长石在高温高压下的导电机制。

2 实　验

2.1 样品准备

实验样品采自湖南衡山钠长石特大型露天矿床，样品新鲜，颜色为白色，致密块状构造。光学显微镜观察表明，样品未发生蚀变和氧化现象。通过电子探针分析，获得了样品的化学成分，如表1所示。

* **收稿日期**：2011-01-06；**修回日期**：2011-02-20

基金项目：中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-Q08-3-4，KZCX2-YW-QN110)；国家自然科学基金(40974051，41174079)

作者简介：胡海英(1983－)，女，博士研究生，主要从事高温高压下矿物岩石电学性质研究.
E-mail：huhaiying1028@163.com

通讯作者：李和平(1963－)，男，研究员，博士生导师，主要从事高压矿物物理实验研究.
E-mail：hepingli_2007@hotmail.com

表 1　样品中各化学成分的质量分数

Table 1　Mass fractions of the chemical components within the sample　　(%)

SiO_2	Al_2O_3	K_2O	CaO	Na_2O	FeO	MgO	Cr_2O_3	TiO_2	BaO
68.54	19.40	0.07	0.22	11.50	0.08	0.01	0.11	0.04	0.02

在超声清洗仪中依次用丙酮和酒精清洗块状钠长石样品,之后放在温度为 400 K 的烘箱中烘 24 h,以去除吸附水。将干燥后的样品放在玛瑙钵中研磨成粒径小于 75 μm 的粉末,然后放置在一个含有 0.025 mm 厚钼箔内衬的紫铜管(内、外径分别为 8 mm 和 9.5 mm,高 20 mm)中,将密封好的铜管放在立方叶蜡石块(32.5 mm×32.5 mm×32.5 mm)内,之后在 YJ-3000t 多面顶压机中在 1 123 K、1.5 GPa 条件下压实烧结 1 h。选择比较低的温压范围合成样品的原因在于,在该温压条件下钠长石矿物相稳定[12]。钼箔的作用在于在热压过程中有效阻止样品与周围环境的互扩散。将热压好的样品打磨成直径为 6.0 mm、高度为 6.0 mm 的圆柱,在超声清洗仪中依次用丙酮和酒精清洗样品,然后放在 400 K 的烘箱中烘 24 h,除去吸附水,以备测量电导率使用。

2.2　实验方法

实验在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完成。关于 YJ-3000t 紧装式六面顶高温高压设备的使用、压力标定以及 Solartron-1260 阻抗/增益-相位分析仪的详细介绍,参见文献[13-15]。

实验样品组装如图 1 所示。为了避免叶蜡石脱水对电导率测量产生影响,传压介质叶蜡石块和叶蜡石堵头在温度为 1173 K 的马弗炉中焙烧 5 h。加热器由 3 层不锈钢片组成。为了保证样品有良好的绝缘环境,在加热器与样品之间用高纯度的氮化硼和氧化铝管作绝缘,样品与氮化硼直接接触,并且在氮化硼和氧化铝中间安装一个厚度为 0.025 mm 的镍金属屏蔽罩,并将其接地。金属屏蔽罩既可有效屏蔽测量过程中外界的电磁干扰,又可以降低样品的温度梯度[16-17]。电极为直径 6.0 mm、厚 0.5 mm 的铂片,电极引线为镍铝合金丝。采用 NiCr-NiAl 热电偶测量温度,测量误差为±10 K。

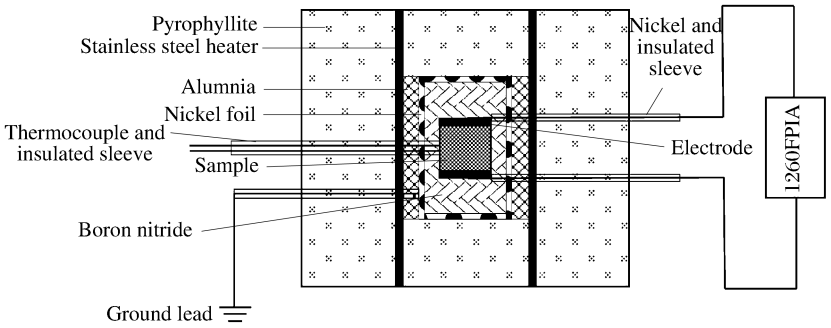


图 1　实验样品组装

Fig. 1　Experimental setup for electrical conductivity measurements

实验时,首先以 1.5 GPa/h 的速率将压力手动升至预定值,再以 20 K/min 的速率将样品温度缓慢升到 973 K,然后在此温度下稳定 3 h,使样品体系达到平衡,在降温过程中测量样品阻抗。相邻采集数据点之间的温度间隔为 50 K,每个温度点上恒温 15～30 min,使样品体系达到物理化学平衡。运行 Solartron-1260 阻抗/增益-相位分析仪(测量精度为 0.05%)的 ZPlot 程序,设定信号电压和频率分别为 1 V 和 10^{-1}～10^{6} Hz 后,仪器自动扫描每个频率下的复阻抗。通过运行 ZView 程序,对 10^{-1}～10^{6} Hz 频率范围内的阻抗谱进行非线性最小二乘法拟合,获得样品在给定温度和压力条件下的阻抗值。实验压力误差为±0.1 GPa,阻抗谱拟合的相对误差小于 2.0%。

3 实验结果及讨论

在压力为 1.0 GPa、温度为 673～973 K 的条件下，实验获得的钠长石复阻抗谱的 Bode 图如图 2、图 3 所示。由图 2 可知：复阻抗的模($|Z|$)和相角(θ)对频率(f)呈现出很强的依赖性；在高频段(10^3～10^6 Hz)，随着频率降低，$|Z|$迅速增大，当频率达到 10^3 Hz 左右时，$|Z|$基本趋于定值，并且随着温度降低，这种趋势向低频段过渡。由图 3 可知：相角在不同温度下表现出相同的规律，即随着扫描频率降低，相角由高频段的近－90°逐渐增大，当频率约 10^2 Hz 时相角趋于 0°，并且随着温度降低这种趋势向低频段过渡；在相同频率下，温度越高，相角的绝对值越小，表明钠长石的导电性对频率具有依赖性。

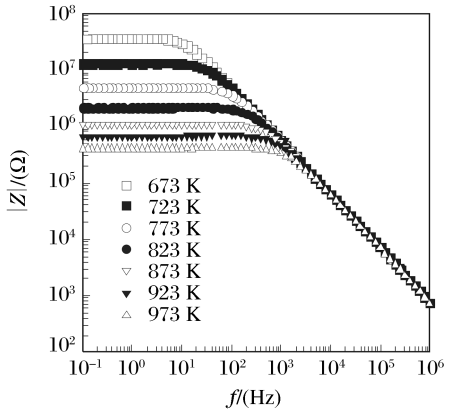


图 2 1.0 GPa、673～973 K 条件下钠长石的模与频率之间关系

Fig. 2 Dependency of the modulus on frequency for albite under the conditions of 1.0 GPa and 673-973 K

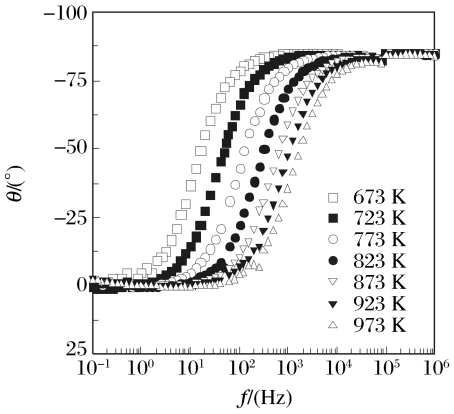


图 3 1.0 GPa、673～973 K 条件下钠长石相角与频率之间关系

Fig. 3 Dependency of the phase angle on frequency for albite under the conditions of 1.0 GPa and 673-973 K

在压力为 1.0 GPa、温度为 673～973 K 的条件下，实验获得的钠长石复阻抗谱的 Nyquist 图如图 4 所示。根据阻抗谱理论[18]，实部(Z')、虚部(Z'')、模($|Z|$)和相角(θ)满足

$$Z' = |Z|\cos\theta \tag{1}$$

$$Z'' = |Z|\sin\theta \tag{2}$$

从图 4 可以看出：不同温度下，复平面出现了一个过原点且圆心和直径均落在实轴的完整半圆弧；随着温度增加，圆弧直径迅速减小。已有研究表明[19-22]，复阻抗图中的半圆弧代表样品颗粒内部的传导机制，其直径对应样品的直流电阻。随着温度升高，半圆弧的直径迅速减小，即电阻迅速降低，电导率增大，表明钠长石的电阻对温度有很强的依赖性，在本实验的温压条件下钠长石呈现出半导体性质。

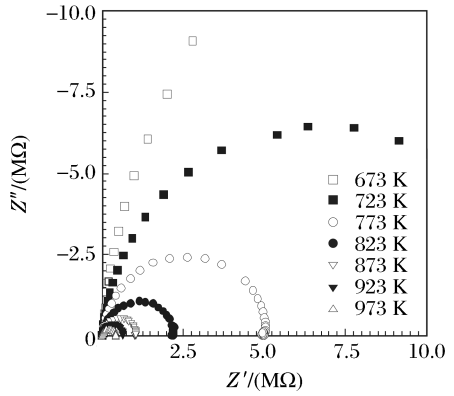


图 4 1.0 GPa、673～973 K 条件下钠长石的复阻抗谱

Fig. 4 Impedance spectra of albite under the conditions of 1.0 GPa and 673-973 K

采用电容和电阻并联的等效电路，对图 4 中的阻抗弧进行 ZView 程序拟合，得到样品的电阻和电容。在 1.0 和 2.0 GPa 压力下，拟合得到的电阻(R)和电容(C)列于表 2，其中 p 为压力，T 为温度。不同温度下样品电导率的计算公式为

$$\sigma = 1/\rho = (L/S)/R = L/SR \tag{3}$$

式中：σ 为电导率(S/m)，ρ 为电阻率(Ω·m)，L 为样品长度(m)，S 为电极面积(m^2)，R 为样品电阻(Ω)。

表 2　1.0、2.0 GPa 和 673～973 K 条件下钠长石阻抗谱拟合参数

Table 2　Fitted parameters of the impedance spectra of albite under the conditions of 1.0, 2.0 GPa and 673-973 K

p/(GPa)	T/(K)	R/(MΩ)	C/(pF)	p/(GPa)	T/(K)	R/(MΩ)	C/(pF)
1.0	673	35.360±0.760	256.1±4.0	2.0	673	54.020±0.120	278.8±4.4
1.0	723	12.770±0.220	249.7±3.4	2.0	723	19.970±0.340	272.2±3.9
1.0	773	4.899±0.072	244.0±3.2	2.0	773	8.138±0.011	266.5±3.6
1.0	823	2.131±0.026	238.7±2.9	2.0	823	3.347±0.038	260.5±3.2
1.0	873	1.018±0.011	234.4±2.7	2.0	873	1.555±0.015	255.9±3.0
1.0	923	0.632±0.006	231.2±2.6	2.0	923	0.837±0.007	251.0±2.8
1.0	973	0.420±0.004	228.8±2.4	2.0	973	0.576±0.004	247.4±2.7

图 5 给出了 1.0、2.0 GPa 压力下钠长石电导率的对数($\lg\sigma$) 与温度倒数(T^{-1})的关系图。由一元线性回归可知，$\lg\sigma$-T^{-1}曲线的线性相关性很好，符合 Arrhenius 关系式，即

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta H/kT) \qquad (4)$$

式中：σ_0 为指前因子(K · S/m)，ΔH 为活化焓(eV)，k 为 Boltzmann 常数(eV/K)，T 为绝对温度(K)。利用线性回归得到的截距和斜率，可以计算出样品的活化焓和指前因子，如表 3 所示，其中 γ^2 为相关系数。

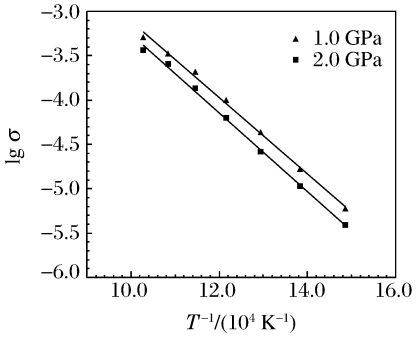


图 5　1.0、2.0 GPa 和 673～973 K 条件下钠长石的 $\lg\sigma$ 与 T^{-1} 的关系

Fig. 5　Relationship between $\lg\sigma$ and T^{-1} for albite under the conditions of 1.0, 2.0 GPa and 673-973 K

由表 3 可知：指前因子随着压力升高微微减小；活化焓在 1.0 GPa 压力下为 0.86 eV，在 2.0 GPa 压力下为 0.89 eV，由于实验压力范围较窄，活化焓随压力的变化并不明显。已有研究表明[16,23]：矿物在没有发生相变的条件下，压力对电导率的影响比较微弱，远小于样品化学成分、样品均匀性及温度对电导率的影响。不同压力下计算出的活化焓为 0.86 eV、0.89 eV，与 Maury[8] 利用交流阻抗谱法在常压、673～1 173 K 条件下通过测量天然和合成钠长石电导率得到的活化能 0.86 eV 一致，与 Ni 等人[24] 在 1.8 GPa、573～1 073 K 条件下用交流阻抗谱法获得的干钠长石玻璃的活化能 0.85 eV 很相近，但是高于 Mizutani 等人[7] 在常压、673～973 K 条件下获得的碱性长石活化能 1.65 eV，这是因为：Mizutani 等人的样品是由富钾和富钠两相长石组成，其化学成分与本实验样品差别很大；此外，Mizutani 等人的测量方法为直流法，在测量过程中会引起样品极化，很难保证实验数据的准确性，而本实验采用的交流阻抗谱法是目前国际上研究物质电学性质最先进的方法，能有效消除样品与电极间的微分电容及接触电阻的影响，保证了测量结果的准确性。

表 3　钠长石电导率的 Arrhenius 关系拟合参数

Table 3　Fitted parameters of Arrhenius relation for the electrical conductivity of albite

p/(GPa)	T/(K)	σ_0/(S/m)	$\lg\sigma_0$	ΔH/(eV)	γ^2
1.0	667～973	15.14	1.18	0.86	0.997 6
2.0	667～973	14.79	1.17	0.89	0.998 4

从图 5 还可以看出：在 1.0、2.0 GPa 和 672～973 K 条件下，钠长石的电导率在 $10^{-5.5}$～$10^{-3.0}$ S/m 范围内变化，且随着压力增加，钠长石电导率降低；$\lg\sigma$-T^{-1}的线性拟合为一条直线，说明钠长石只有一种传导机制。从钠长石的晶体结构和较低的活化焓可分析得出，钠长石的导电机制可能为离子导电，存

在于晶体中的缺陷为 Frenkel 点缺陷[25]，缺陷反应为

$$Na_{A_1}^{\cdot} + V_i' = Na_i^{\cdot} + V_{A_1}' \tag{5}$$

式中：$Na_{A_1}^{\cdot}$ 为晶格 A_1 位置上的钠离子，V_i' 为间隙中的空位，$Na_i^{\cdot}$ 为跃迁到间隙位置上的钠离子，V_{A_1}' 为 A_1 位置上留下的空位。高温下，钠离子获得足够的能量，越过由周围缺陷和离子形成的势垒而迁移到间隙中，在原来的钠离子位置上留下一个空位，因而高温下钠长石表现出离子导电性，导电过程主要表现为间隙钠离子在晶体内的通道中迁移。

影响离子导电的因素有温度、晶体结构、晶格缺陷等，而晶体结构状态在一定程度上反应了离子活化能的大小。对于结构松散的晶体，由于可供移动的间隙大，间隙离子容易迁移，因此活化能较低[26]。长石为架状结构铝硅酸盐，即 $(SiO_4)^{4-}$ 四面体和 $(AlO_4)^{5-}$ 四面体沿三维空间联结成一个连续的骨架，而 Al^{3+} 并非四价，所以骨架本身带负电荷，且电价较低，半径较大的阳离子 K^+、Na^+、Ca^{2+} 等能填充在骨架空隙中，这样的空隙甚至会连通成孔道存于结构中[27]。钠长石的这种敞开式结构存在有利于离子迁移的通道，为钠离子迁移提供有利条件，这也是实验获得的活化焓较低(0.86 和 0.89 eV)的原因。

造岩矿物电导率研究对于解析实验获得的地壳岩石电导率非常重要。对于地壳主要的造岩矿物，如石英、云母、斜长石、角闪石、辉石等，根据它们的电导率及其在岩石中所占的比例，可以解析岩石电导率的导电机制并建立电导率模型。长石族矿物均为架状硅酸盐，只是在 M 位置上填充的阳离子不同，因此钠长石电导率实验研究能帮助认识整个长石族矿物的电学性质。通过对石英、云母、角闪石、辉石等造岩矿物电导率[28-33]进行比较，可知本实验获得的钠长石电导率比其它矿物的电导率低，这应与其化学组成有关。在干体系下，矿物岩石电导率主要取决于化学组成，即低导性氧化物(如 SiO_2、Al_2O_3、CaO、MgO)和高导性氧化物(如 Na_2O、K_2O、FeO)之间的比值[34]。由钠长石化学成分分析结果(见表 1)可知，钠长石中低导性氧化物的含量较高，这是造成其电导率偏低的主要原因。因此，在含有长石的地壳岩石中，长石族矿物可看成不导电矿物，而对于含 Fe 的角闪石、辉石以及含水矿物云母则属于相对导电矿物，整个地壳岩石的电导率取决于所含矿物的电导率及其在岩石中所占的比例。

4 结 论

采用交流阻抗谱法，测量了钠长石在 1.0、2.0 GPa 和 673～973 K 条件下的复阻抗谱，实验结果表明：在实验的温压范围内，钠长石的复阻抗谱、模、相角对频率有一定的依赖性，在复阻抗平面上出现了表征颗粒内部导电机制的完整半圆弧；钠长石的电导率对温度有很强的依赖性，随温度升高而增加，并且 $\lg\sigma$ 与 T^{-1} 之间符合 Arrhenius 关系；在 1.0、2.0 GPa 和 673～973 K 条件下，钠长石的电导率在 $10^{-5.5}$～$10^{-3.0}$ S/m 范围内变化，压力对钠长石的电导率影响不明显。根据实验得到的较低活化焓，结合钠长石结构，分析得出钠长石的导电机制可能为本征离子导电，载流子为间隙钠离子。相对其它地壳造岩矿物，钠长石的电导率明显偏低，在岩石中可看作不导电矿物。

References:

[1] Lasštovičková M. A review of laboratory measurements of the electrical conductivity of rocks and minerals [J]. Phys Earth Planet In, 1991, 66: 1-11.

[2] Xu Y S. A review on the electrical conductivity of mantle minerals and rocks [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(1): 229-238. (in Chinese)
徐有生. 地幔矿物岩石的电导率研究进展 [J]. 地学前缘, 2000, 7(1): 229-238.

[3] Downs R T, Hazen R M, Finger L W. The high-pressure crystal chemistry of low albite and the origin of the pressure dependency of Al-Si ordering [J]. Am Mineral, 1994, 79: 1042-1052.

[4] Gu Z J, Guo C H, Zhang Y B, et al. Variation of perthite and conductivity in granite under the high-temperature and high-pressure [J]. Progress in Geophysics, 1993, 8(4): 239-243. (in Chinese)
顾芷娟, 郭才华, 张彦波, 等. 高温高压下花岗岩条纹长石和电导率的变化 [J]. 地球物理学进展, 1993, 8(4): 239-243.

[5] Jin S Y. Plagioclase fabrics and seismic anisotropy of the lower crust [J]. Geological Science and Technology information,2000,19(3):1-6. (in Chinese)
金淑燕. 斜长石组构与下地壳各向异性 [J]. 地质科技情报,2000,19(3):1-6.

[6] Li X,Sun B D,Du H H,et al. Experimental research on effect of feldspar content to electrical property of rock [J]. Well Logging Technology,2008,32(2):143-147. (in Chinese)
李　新,孙宝佃,杜环虹,等. 长石含量对岩石电性影响的实验研究 [J]. 测井技术,2008,32(2):143-147.

[7] Mizutani H,Kanamori H. Electrical conductivities of rock-forming minerals at high temperatures [J]. J Phy Earth,1967,15(2):25-31.

[8] Maury R. Conductibilite electrique des tectosilicates. Ⅰ. Methode et resultats experimentaux [J]. Bull Soc franc Min Crist,1968,91:267-278.

[9] Piwinskii A J,Duba A G. Feldspar electrical conductivity and the lunar interior [J]. Lunar Sci Conf,1975:2899-2907.

[10] Piwinskii A J,Duba A,Ho P. The electrical conductivity of low and high albite throughout its melting interval at 100 kPa [J]. Can Mineral,1977,15:196-197.

[11] Bakhterev V V. High-temperature electric conductivity of some feldspars [J]. Dokl Earth Sci,2008,420(1):554-557.

[12] Liu X. Phaserelations in the system $KAlSi_3O_8$-$NaAlSi_3O_8$ at high pressure-high temperature conditions and their implication for the petrogenesis of lingunite [J]. Earth Planet Sci Lett,2006,246:317-325.

[13] Xie H S. Materials Sciense of the Earth's Interior [M]. Beijing:Science Press,1997:42-53. (in Chinese)
谢鸿森. 地球深部物质科学导论 [M]. 北京:科学出版社,1997:42-53.

[14] Li H P,Xie H S,Guo J. *In situ* control of oxygen fugacity at high temperature and high pressure [J]. J Geophys Res,1999,104(B12):439-451.

[15] Shan S M,Wang R P,Guo J,et al. Pressure calibration for the sample cell of YJ-3000t multi-anvil press at high-temperature and high-pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2007,21(4):367-372. (in Chinese)
单双明,汪日平,郭　捷,等. YJ-3000t 型紧装式六面顶大腔体高温高压实验装置样品室的压力标定 [J]. 高压物理学报,2007,21(4):367-372.

[16] Xu Y S,Shankland T J,Duba A G. Pressure effect on electrical conductivity of mantle olivine [J]. Phys Earth Planet In,2000,118:149-161.

[17] Dai L D,Li H P,Hu H Y,et al. Experimental study of grain boundary electrical conductivities of dry synthetic peridotite under high-temperature,high-pressure,and different oxygen fugacity conditions [J]. J Geophys Res,2008,113:B12211.

[18] Shi M L. AC Impedance Spectroscopy Principles and Applications [M]. Beijing:National Defence Industry Press,2001:1-18. (in Chinese)
史美伦. 交流阻抗谱原理及应用 [M]. 北京:国防工业出版社,2001:1-18.

[19] Roberts J J,Tyburczy J A. Frequency dependent electrical properties of dunite as functions of temperature and oxygen fugacity [J]. Phys Chem Miner,1993,19(8):545-561.

[20] Dai L D,Li H P,Liu C Q,et al. Experimental study on impedance spectra of iherzolite under high temperature and high pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2005,19(1):29-34. (in Chinese)
代立东,李和平,刘丛强,等. 高温高压下二辉橄榄岩的阻抗谱实验研究 [J]. 高压物理学报,2005,19(1):29-34.

[21] Huang X G,Bai W M,Zhou W G. Experimental study on electrical conductivity of biotite- and plagioclase-bearing gneiss at high temperature and high pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2008,22(3):237-244. (in Chinese)
黄晓葛,白武明,周文戈. 高温高压下黑云斜长片麻岩的电性研究 [J]. 高压物理学报,2008,22(3):237-244.

[22] Xie H S,Zhou W G,Zhu M X,et al. Elastic and electrical properties of serpentinite dehydration at high temperature and high pressure [J]. J Phys Condens Matter,2002,14(44):11359-11363.

[23] Yoshiasa A,Ohtaka O,Sakamoto D,et al. Pressure and compositional dependence of electric conductivity in the $(Mg_{1-x}Fe_x)_{1-\delta}O$ ($x=0.01$-0.40) solid-solution [J]. Solid State Ionics,2009,180:501-505.

[24] Ni H,Keppler H. Electrical conductivity of albite melts at high pressures [C]. American Geophysical Union Fall Meeting Abstracts,2009:MR43A-1867.

[25] Behrens H,Johannes W,Schmalzried H. On the mechanisms of cation diffusion processes in ternary feldspars [J]. Phys Chem Miner,1990,17(1):62-78.

[26] Guan Z D, Zhang Z T, Jiao J S. Physical Properties of Inorganic Materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 225-226. (in Chinese)
关振铎, 张中太, 焦金生. 无机材料物理性能 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 225-226.

[27] Zhu Y M, Han Y X. Application of Crystal Chemistry in Mineral Materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 148-149. (in Chinese)
朱一民, 韩跃新. 晶体化学在矿物材料中的应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 148-149.

[28] Wang D J, Li H P, Yi L, et al. Anisotropy of synthetic quartz electrical conductivity at high pressure and temperature [J]. J Geophys Res, 2010, 115: B09211.

[29] Bagdassarov N S, Delépine N. α-β inversion in quartz from low frequency electrical impedance spectroscopy [J]. J Phys Chem Solids, 2004, 65: 1517-1526.

[30] Laštovičková M. Laboratory measurements of electrical conductivity of biotites [J]. Stud Geophys Geod, 1991, 35(2): 125-129.

[31] Schmidbauer E, Kunzmann T, Fehr T, et al. Electrical resistivity and ^{57}Fe Mössbauer spectra of Fe-bearing calcic amphiboles [J]. Phys Chem Miner, 2000, 27(5): 347-356.

[32] Dai L, Karato S. Electrical conductivity of orthopyroxene: Implications for the water content of the asthenosphere [J]. Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci, 2009, 85(10): 466-475.

[33] Xu Y S, Shankland T J. Electrical conductivity of orthopyroxene and its high pressure phases [J]. Geophys Res Lett, 1999, 26(17): 2645-2648.

[34] Bai L P, Du J G, Liu W, et al. The experimental studies on electrical conductivities and P-wave velocities of anorthosite at high pressure and high temperature [J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(6): 638-646. (in Chinese)
白利平, 杜建国, 刘 巍, 等. 高温高压下斜长岩纵波速度与电导率实验研究 [J]. 地震学报, 2002, 24(6): 638-646.

Experimental Study on Impedance Spectra of Albite at High Temperatures and High Pressures

HU Hai-Ying[1,2], LI He-Ping[1], DAI Li-Dong[1,3], SHAN Shuang-Ming[1], ZHU Cheng-Ming[1]

(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. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*;
3. *Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, Tokyo* 152-8551, *Japan*)

Abstract: The electrical conductivity of albite was *in-situ* measured at pressures of 1.0, 2.0 GPa and temperatures of 673-973 K using a. c. impedance spectroscopy method in YJ-3000t multi-anvil press. The experimental results indicate that the electrical conductivity (σ) of albite ranges from $10^{-3.0}$ to $10^{-5.5}$ S/m. The modulus and phase angle of complex impedance strongly depend on frequency. The electrical conductivity of samples rapidly increases with increasing temperature (T), and the relationship between $\lg\sigma$ and T^{-1} fits Arrhenius relation. In addition, the electrical conductivity of samples decreases with increasing pressure in the investigated temperature and pressure range. The dominating conduction mechanism for albite is suggested to be the migration of sodium cations within the channels in the aluminosilicate framework.

Key words: albite; high temperatures and high pressures; impedance spectra; electrical conductivity