文章编号：1000-5773(2008)03-0237-08

高温高压下黑云斜长片麻岩的电性研究*

黄晓葛[1]，白武明[1]，周文戈[2]

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所，北京 100029；
2. 中国科学院贵阳地球化学研究所，贵州贵阳 550002)

摘要：在压力 1 GPa、温度 250～1 100 ℃、频率 0.1 Hz～1 MHz 的条件下，采用阻抗谱方法，对来自阴山造山带的太古代黑云斜长片麻岩进行了电导率实验研究。实验发现：(1) 所有样品的阻抗谱都是由一个大的高频半圆弧Ⅰ和一个小的被压缩了的低频弧Ⅱ组成，阻抗弧Ⅰ主要代表矿物颗粒内部传导机制，阻抗弧Ⅱ更有可能代表的是样品和电极之间的传导机制；(2) 电导率随温度的变化遵循 Arrhenian 定律，但在 700～750 ℃间有近一个量级的跳跃，通过对比实验前后样品的显微照片和探针分析数据，认为这一电导率的大幅跳跃可能是样品中黑云母发生大量脱水熔融的缘故；(3) 在高温段 750～1 100 ℃，部分熔融样品的电导率主要由钠离子传导控制；(4) 在低温段 250～700 ℃，样品的激活能为 0.53 eV；在高温段 750～1 100 ℃，样品的激活能为 1.41 eV。激活能的改变可能与样品的结构变化有关，还与样品和熔体中钠的含量以及扩散有关。

关键词：电导率；黑云斜长片麻岩；激活能；阴山造山带
中图分类号：O521.2；P584 **文献标识码**：A

1 引 言

模拟地球内部的温度和压力条件，利用阻抗谱方法测量电性参数，不仅可以帮助科学家们获得地球内部物质的组成、传导机制、运动变化状态[1]，而且还可以给野外的电磁测量结果提供有力的支持和补充。高温高压下岩石矿物的电性研究最早起始于 20 世纪四五十年代，重点放在了对矿物单晶和多晶，尤其是橄榄石单晶和多晶的研究之上[2-6]，其主要原因是单晶和多晶的矿物成分单一，结构相对简单，但在应用其实验结果来解释地球物理资料时受到限制，因此，一些研究人员把目光转向对天然岩石，尤其是地壳岩石的研究之上，依据不同的研究方向给出了电性参数与其影响因素(温度、压力、氧逸度、熔体比例、物质成分、组构)之间的各种定性和定量关系[7-8]。但到目前为止，这些实验工作大多是在常压下进行的[9-11]，尽管在中下地壳深度范围内，压力对岩石电导率的影响不大，但岩石的固相线温度却与压力有直接的关系，即与岩石的熔点有直接的关系。

黑云斜长片麻岩是中下地壳广泛分布的主要岩石类型，具有典型的片麻状构造和鳞片变晶结构，主要由斜长石、石英和黑云母组成，斜长石多为中长石。Gardien[12]、吴宗絮[13]、杨晓松等[14]曾进行过黑云母脱水熔融实验，但很少有学者对其进行电性研究[15]。本研究在高温高压(1 GPa、250～1 100 ℃)条件下，对采自阴山造山带的太古代黑云斜长片麻岩进行了电导率的研究，同时探讨其样品内的导电机制。

2 实验样品和方法

实验样品采自阴山造山带内的内蒙古包头五当召地区(东经 110°18.72′，北纬 40°48.62′，高程

* **收稿日期**：2007-06-09；**修回日期**：2007-08-29
基金项目：国家自然科学基金(40674047，40544015)；中国科学院创新项目(KZCX3-SW-148)
作者简介：黄晓葛(1970—)，女，博士，副研究员，主要研究方向为岩石物理学. E-mail：xghuang@mail.igcas.ac.cn

1 620 m 处)。样品为太古代桑干群灰白色中细粒黑云斜长片麻岩,其矿物组成(体积分数)为:62%斜长石(An_{29-32}),22%黑云母,15%石英,其余为少量的钾长石和石榴子石。

实验在中国科学院地球化学研究所的 YJ-3000T 压力机的紧装式六面顶设备上完成。电导率测量的样品组装见图 1,样品为高 4 mm、直径 6 mm 的圆柱体,其轴向垂直于样品的片麻理。利用 Mo 与 MoO_2 的固体化学反应来控制氧逸度。为避免外界吸附水和结晶水对实验体系的影响,实验前将作为传压介质的叶蜡石立方块(32 mm × 32 mm × 32 mm)焙烧至 900 ℃,叶蜡石管焙烧到 1 000 ℃,以完全除去结晶水。实验采用双层绝缘管:外层为长 18 mm、外径 12.5 mm、内径 9 mm 的叶蜡石管;内层为长18 mm、外径 9 mm、内径 6 mm 的 MgO 管。实验用电极为直径 6 mm、厚 0.1 mm 的钼片。上下电极两端分别为一直径 6 mm、高 7 mm 的 MgO 堵头。两层绝缘管之间和上下 MgO 堵头外部包裹了一层与大地零电势相连的钼金属盾,以避免样品与周围介质之间发生漏电,屏蔽外加热电场的干扰。加热器为 3 层 0.1 mm 厚的不锈钢片,温度用 NiCr-NiAl 热电偶测定,热电偶紧靠样品中部,温度误差为±5 ℃。实验采用恒压升温的方法,测量点间隔 50 ℃,每个温度点稳定足够长的时间(30 min~1 h),前后 5 min 所测定的模|Z|的相对误差在 5%以内,可认为体系近似达到了平衡,然后用 Solartron 阻抗分析仪同时测定模|Z|和相角 θ,用最小二乘法拟合得到样品的电阻,电导率测量所用电压为 1 V,频率为 0.1 Hz~1 MHz。

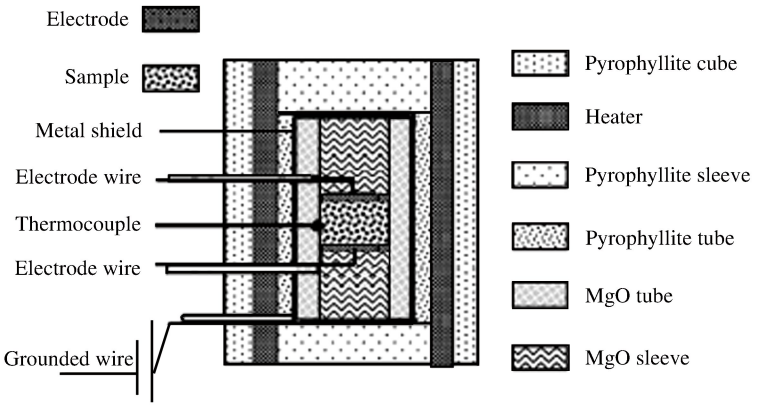


图 1 电导率测量样品组装剖面图

Fig. 1 Assembly used for electrical conductivity measurement of sample

3 实验结果

在 1 GPa 的压力条件下,获得了不同温度下黑云斜长片麻岩的电导率测量结果。图 2 分别给出了不同温度下黑云斜长片麻岩的模值|Z|和相角 θ 随频率的变化情况。

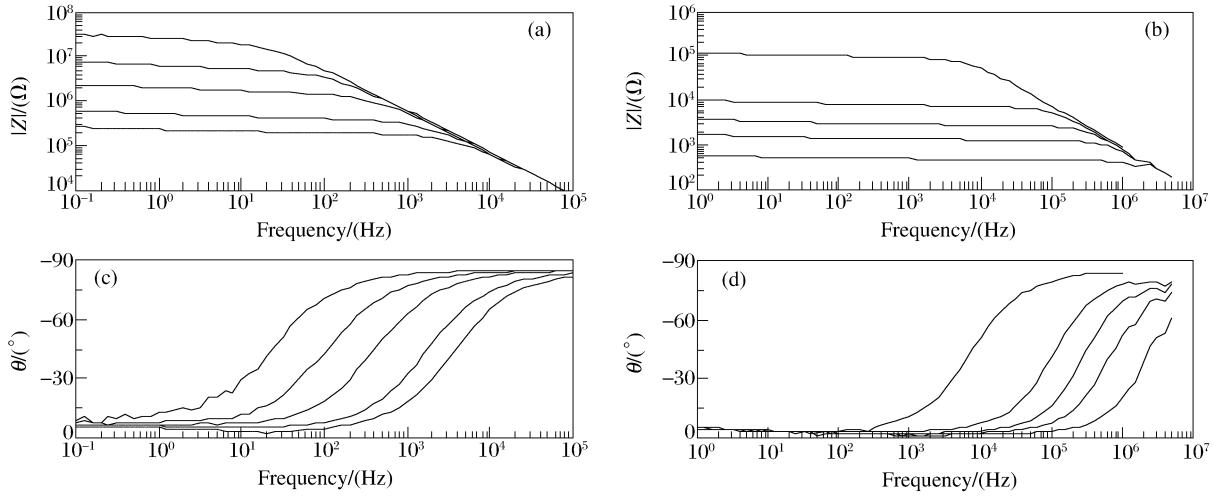


图 2 压力 1 GPa、温度 250~650 ℃和 700~1 100 ℃(间隔 100 ℃)下恢复样品模值((a)、(b))和相角((c)、(d))随频率的变化

Fig. 2 Magnitude((a),(b)) and phase((c),(d)) as function of frequency at pressure of 1 GPa and at temperature from 250 ℃ to 650 ℃ and from 700 ℃ to 1 100 ℃ (100 ℃ increment)

图 2 中相角和频率的关系图显示:在 1 GPa 压力和较低温度(250～700 ℃)下,相角对频率有很大的依赖性,这说明电导率存在频散效应,这种效应是由极化作用和介电损失引起的,但随着温度升高,相角对频率的依赖性减弱,在 750～1 100 ℃的温度范围,从 10 kHz 到 1 Hz,相角都接近于零,频散效应消失。从模和频率的关系中可以看出:在 1 Hz 的情况下,随着温度的增加,模值在不断下降,从 250 ℃时的大约 2.6×10^{7} 下降到 1 100 ℃时的大约 5.8×10^{2},有约 5 个数量级的变化,并且在 700～800 ℃温度范围内有一个较大的变化,每 50 ℃下降 3.5 倍左右。

图 3 中的阻抗谱图显示:在压力 1 GPa、温度 250～1 100 ℃和频率 0.1 Hz～1 MHz 范围内,阻抗谱都是由一个大的高频半圆弧Ⅰ和一个小的被压缩了的低频弧Ⅱ组成。根据阻抗谱原理[6,16],阻抗弧Ⅰ主要代表样品矿物颗粒内部的传导机制。随着温度的增加,复阻抗谱的实部和虚部都逐渐变小,在 400～900 ℃之间,圆弧Ⅰ变得很完整。由于我们测量所用的最低频率只有 0.1 Hz,阻抗弧Ⅱ看上去更像是一条直线而不是半圆弧,在高压下,阻抗弧Ⅱ更有可能代表的是样品和电极之间的传导机制[17]。

图 4 为电导率($\lg\sigma$)与温度($10\,000/T$)的关系图,在 250～700 ℃和 750～1 100 ℃之间,二者分别具有很好的线性关系,符合 Arrhenius 公式

$$\sigma=\sigma_0\exp(-E/kT)$$

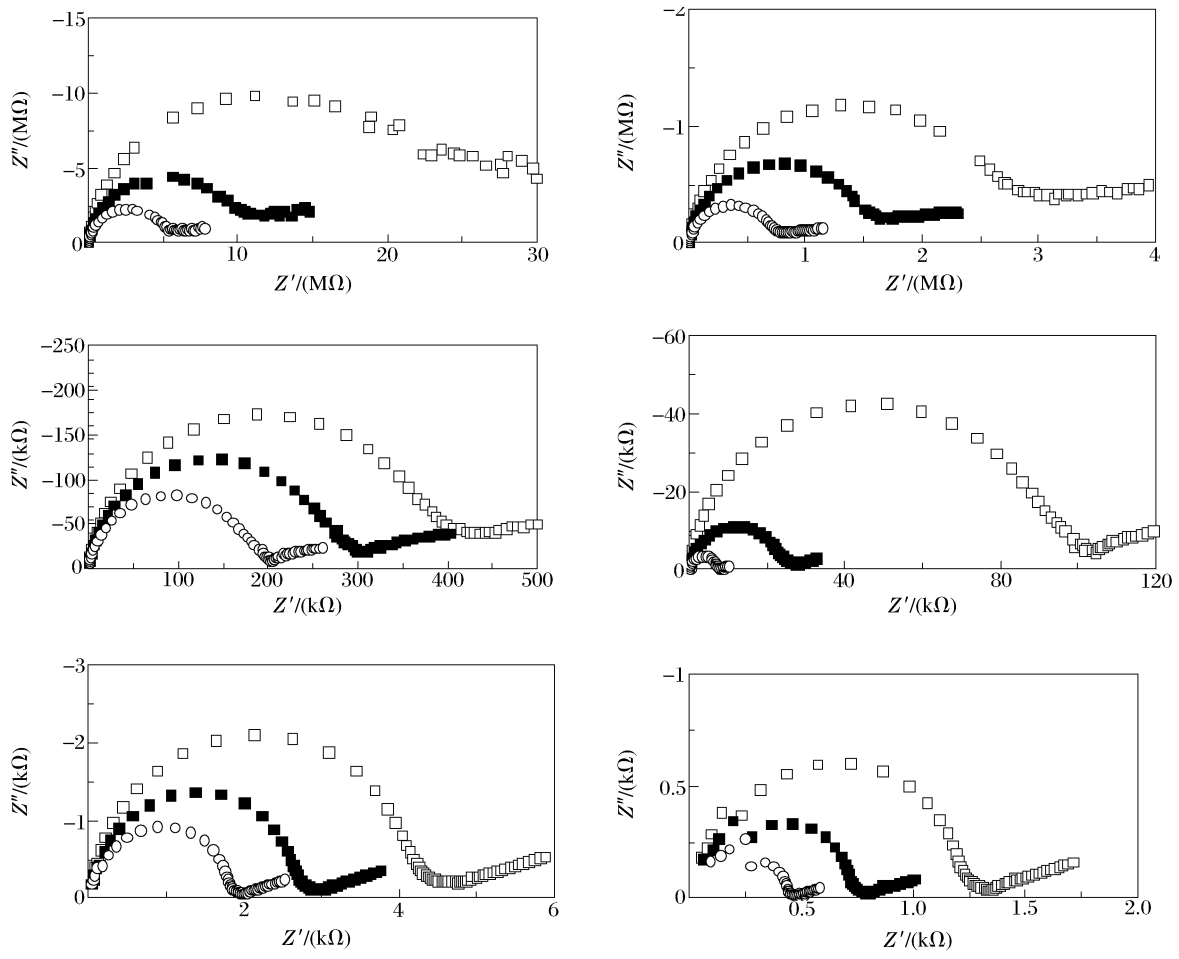


图 3　压力 1 GPa、不同温度 250～1 100 ℃(间隔 50 ℃)下恢复样品的阻抗谱

(每个阻抗谱中,左边的高频半圆弧是阻抗弧Ⅰ,右边的低频被压缩弧是阻抗弧Ⅱ)

Fig. 3　Impedance spectra of recovered samples at different temperature between 250 ℃ and 1 100 ℃ (50 ℃ increment) and at pressure of 1 GPa

(A semicircular high-frequency arc Ⅰ (grain-interior response) lies at left of each spectrum; a depressed low-frequency arc Ⅱ (sample-electrode interaction) lies at right of each spectrum)

式中：σ_0为指前因子(S/m)，T为绝对温度(K)，k为Boltzmann常数，E为激活能(eV)。对$\lg\sigma$-10 000/T曲线上的数据进行线性拟合，得到样品的激活能分别为0.53 eV(250～700 ℃之间，斜率为－0.267 6)和1.41 eV(750～1 100 ℃之间，斜率为－0.711 1)。不论在低温段还是高温段，样品电导率随温度的变化都遵循Arrhenius定律，是一条直线，表明样品在低温段和高温段分别受单一传导机制控制；而直线斜率的变化则表明从低温段到高温段，样品内的传导机制发生了变化，或者是主要的导电物质种类发生了变化。

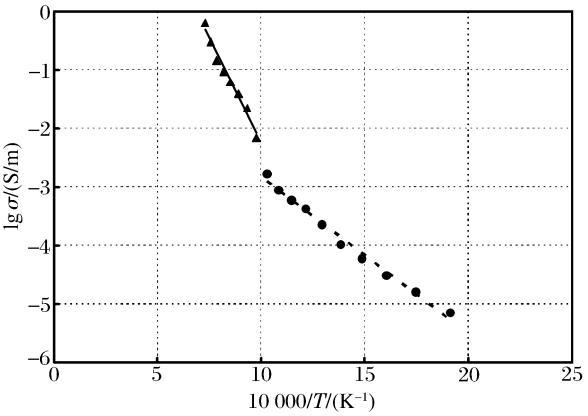


图4 1 GPa压力下样品的$\lg\sigma$-10 000/T关系图

Fig. 4 Log of bulk electrical conductivity vs. reciprocal temperature diagram at 1 GPa constant pressure

4 讨论与结论

在压力1.0 GPa、温度300～700 ℃之间时，黑云斜长片麻岩样品的电导率介于0.01～1 mS/m，与斜长岩相比[18]，其电导率相对较高，这与其化学组成有关。依据电子探针分析的结果(表1)，黑云斜长片麻岩中高导氧化物(Na_2O、K_2O、FeO)的含量较高，其与低导氧化物(SiO_2、Al_2O_3、CaO、MgO)的含量比值也相对较高。黑云斜长片麻岩的这种化学组成是造成其电导率在低温段较高的主要因素之一。另外，我们的样品是天然的变质岩，经历了长期的地质作用，样品中矿物颗粒内部和颗粒边界含有大量的杂质和缺陷，这将极有可能在样品内部形成一个良好的导电网络，使其在低温段内的电导率相对较高，激活能相对较低。但由于没有颗粒内部杂质含量多少等相应数据的支持，仍不知道这些杂质和缺陷对样品总电导率的贡献是多少，Roberts和Tyburczy[19]的研究表明：有时颗粒边界比颗粒内部更易导电，但它却并不是总能够增加岩石样品的电导率。无论如何，对天然黑云斜长片麻岩来说，高压下其电传导可能是由颗粒内部和颗粒边界同时参与的混合传导机制控制，但颗粒内部的传导对总电导率的贡献远远大于颗粒边界的贡献[17]。Fuji-ta等[15]在1 GPa压力下对来自于日本Higo变质带的片麻岩进行了电导率的测量，其中他们A样品的电导率测量是垂直于样品的片麻理，与我们的样品相同。从327 ℃到727 ℃，他们A样品的电导率从0.069 mS/m增加到1 mS/m；而我们的样品从300 ℃到700 ℃，电导率从0.016 mS/m增加到1.7 mS/m，与他们A样品的电导率大致相同。另外，这也从另一个侧面论证了我们实验过程和结果的可靠性。但Fuji-ta等人[15]的A样品在327～727 ℃之间的激活能是0.27 eV，而我们样品在250～700 ℃之间的激活能是0.53 eV，相对较高，这主要可能与① 样品成分、② 测量方法、③ 粒度大小、④ 熔体是否存在等因素有关。

表1 实验前黑云斜长片麻岩中矿物和实验后恢复样品中熔体的化学成分分析

Table 1 Chemical composition of minerals in biotite- and plagioclase-bearing gneiss before experiment and melt in recovered sample after experiment(Conditions: 1 GPa, 1 100 ℃) (%)

Composition	w_{SiO_2}	w_{TiO_2}	$w_{Al_2O_3}$	w_{MgO}	w_{CaO}	w_{MnO}
Plagioclase	60.75	0.01	25.47	0.00	6.02	0.04
Biotite	36.80	4.74	14.85	13.65	0.00	0.39
Melt	54.59	2.45	18.43	3.51	4.34	0.14
Composition	w_{FeO}	w_{Na_2O}	w_{K_2O}	$w_{Cr_2O_3}$	w_{H_2O}	w_{total}
Plagioclase	0.00	7.98	0.33	0.00	0.00	100.60
Biotite	16.33	0.04	9.61	0.01	4.02	100.44
Melt	7.14	1.82	2.54	0.00	0.00	94.96

从 700 ℃到 750 ℃,样品的 lgσ 从 −2.76 S/m 变为 −2.16 S/m(图 4),跳跃幅度高达 0.6 S/m,通过对比实验前后样品的微观照片(图 5)发现:实验前,黑云斜长片麻岩样品中含有约 62%的斜长石和 20%的黑云母;而实验后,样品中含有约 50%的斜长石和 50%的熔体,还有少量残存的黑云母(<1%)。故此,我们认为这一电导率大幅跳跃的原因是:在 1 GPa 压力下、700～750 ℃温度范围内,样品中 20%的黑云母发生了大量脱水熔融。

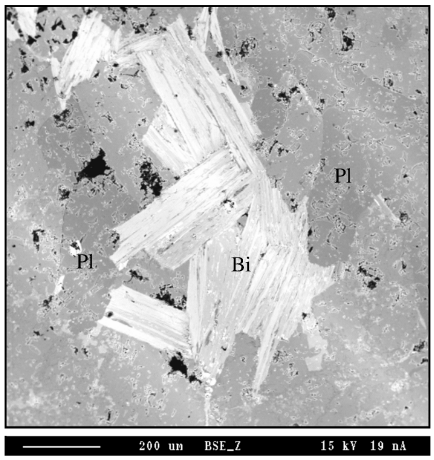


图 5(a)　实验前黑云斜长片麻岩的 SEM 图

Fig. 5(a)　SEM image of biotite- and plagioclase-bearing gneiss

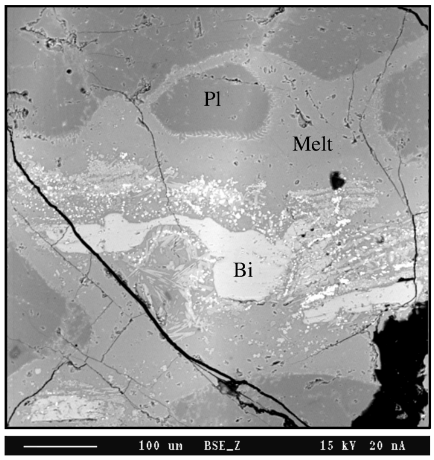


图 5(b)　实验后恢复样品的 SEM 图

Fig. 5(b)　SEM image of recovered sample after 1100 ℃ and 1 GPa experiment

Skjerlie 等人[20]曾在 1.0 GPa 压力下进行了富 F 英云闪长质片麻岩(19%(质量分数)黑云母(其中 F 含量为 0.47%,TiO_2 为 1.31%)、2%角闪石、48%斜长石和 30%石英)的脱水熔融实验。研究发现:在 875～950 ℃间,有少量熔体(875 ℃时,<5%; 950 ℃时,约 10%)产生,样品中的黑云母略有减少;在 950～975 ℃间,有大量熔体(975 ℃时,约 25%)产生,样品中的黑云母几乎消失;在 975～1050 ℃间,熔体略有增加(1050 ℃时,约 28%),但直到 1025 ℃后,样品中的黑云母才完全不可见;在 1075 ℃时,熔体约为 50%,样品中的斜长石、石英减少,并且他们认为黑云母的高热稳定性主要是因为黑云母中的 F 不断替代 OH 的缘故,而不是因为人们通常认为的黑云母中 TiO_2 含量的增加[14,21]。如果在平衡条件下,另外参考 Gardien[12]、杨晓松等[14]的实验结果,我们的黑云斜长片麻岩也应该有类似的脱水熔融过程,这一点从我们实验后样品的显微分析结果中也得到了部分证实。例如,在 1.0 GPa 压力、1100 ℃温度进行电导率测量后又快速冷却所获得的样品中,发现有少量残存的黑云母(图 5(b))。尽管我们的实验系统没有达到完全的平衡,但仍可以说明黑云母的热稳定性较高,与 Skjerlie 等[20]在 1000 ℃后的实验样品中仍可见黑云母的结果是一致的。另外,结合图 4 中电导率随温度变化的情况和图 5(b)的显微分析结果,以及参考 Skjerlie、Gardien 等[12,20]的黑云母脱水熔融实验结果,进一步推断:本样品中黑云母在700 ℃到 750 ℃这一约 50 ℃很窄的温度区内确实发生了大量脱水熔融。但是,我们实验所得到的黑云母大量脱水熔融温度区间(700～750 ℃)似乎比 Skjerlie[20](950～975 ℃)、Gardien[12](850～950 ℃,固相线温度为 800 ℃)、吴宗絮[13](812～837 ℃)和杨晓松[14](固相线温度为 900 ℃)等人实验结果低。这可能主要有几个方面的原因。(1) 样品成分不同。Skjerlie[20]、Gardien[12]和吴宗絮[13]等人在进行黑云母脱水熔融实验时,虽然所使用的样品都是片麻岩,主要矿物组成为黑云母、斜长石、石英,但它们在样品中所占比例不同;并且每一种矿物在化学成分上也略有差别,比如黑云母中 F 和 TiO_2 含量等,这些矿物构成上的差别(主要组成矿物和次要矿物含量的多少)和每种矿物化学成分上的变化,或许就是各学者实验得到的黑云母脱水熔融温度各不相同的原因之一。(2) 样品结构的不同。Skjerlie[20]、Gardien[12]和吴宗絮[13]等学者在进行黑云母脱水熔融实验时,使用的是人工合成的粉末状样品,实验样品的结构与我们实验所采用的天然样品有极大的不同,例如颗粒边界的不同。与人工合成样品相比,天

然样品中颗粒边界很宽,并且含有很多杂质,这或许是我们实验结果中黑云母大量脱水熔融温度区间比他们的结果都低的又一个原因。(3) 黑云母一般在700～750 ℃温度范围脱出层间水,但是否马上就有熔体产生仍有争议,但由于我们的样品中还有少量白云母,它可以降低样品的固相线温度[12],因此,我们认为电导率在700～750 ℃之间的跳跃主要是由于黑云母脱水熔融引起的。

在部分熔融发生之前,也就是700 ℃之前,样品电导率的高低主要由黑云斜长片麻岩样品中矿物相的电导率控制,在部分熔融发生之后,也就是750 ℃之后,在部分熔融样品内部,相对于矿物相(斜长石、黑云母等),熔体的电导率非常高,样品的电导率主要由熔体相的电导率控制。从700 ℃到750 ℃,尽管黑云母发生了大量的脱水熔融反应,但由于这一过程很快,熔体没有完全湿润颗粒边界,呈囊状分布于三相矿物接触处,并没有完全连通,因此,熔体对总电导率的贡献或许很小[11]。

从750 ℃到1 100 ℃,我们样品的电导率很高,介于6.9 mS/m与650 mS/m之间,这是因为样品中含有大量熔体的缘故。在这一温度段,样品的电导率随温度的变化也遵循Arrhenius定律,但在经历了700 ℃到750 ℃黑云母大幅度脱水熔融的变化之后,熔体在样品中已经形成了一个互相连通的网格[14],网格状熔体中离子的传导控制了实验样品电导率的高低。在熔体中,主要的变网离子是钠离子,其它离子主要为成网离子,因此,熔体中钠离子是主要的电荷载体。同时Waff[22-23]和Rai等[24-25]的实验也证实:基性和中性熔体的电导率是由钠离子的传导控制的。因此,我们认为,在高温段,熔体(表1)中钠离子的传导决定了部分熔融样品的传导机制。另外值得注意的是,在高温段,部分熔融样品的激活能为1.41 eV,这可能与熔体中Na_2O的含量有关[1]。Behrens[26]的实验结果显示:在熔体中,随着Na含量的减少,Na扩散的激活能增加,在贫-Na的拉斑玄武岩熔体中,Na扩散的激活能为1.55 eV[27],与我们的实验结果相近。

纵观整个结果可以得出:(1) 在250～700 ℃的低温段,黑云斜长片麻岩样品的激活能相对较低,约为0.53 eV,样品内的主要传导机制受颗粒内部和颗粒边界混合传导控制,但颗粒内部传导对总电导率的贡献远大于颗粒边界;(2) 在700～750 ℃,样品中黑云母的大量脱水熔融反应,使得样品的电导率在一个约50 ℃的很窄的温度区间内有近一个量级的跳跃;(3) 在750～1 100 ℃的高温段,部分熔融样品中的钠离子是主要的电荷载体,样品激活能相对较高,约为1.41 eV,这可能与熔体中Na的含量和扩散有关;(4) 如果在高热流或地壳增厚地区,如青藏高原,黑云斜长片麻岩的脱水熔融或许是中地壳20～30 km深度范围内高导层形成的一个主要原因,其产生的安山-闪长质岩浆上侵、冷却、重结晶后形成的安山岩、花岗闪长岩等或许将成为上地壳的主要组成岩石。

中国科学院贵阳地球化学研究所深部物质实验室免费提供了压机等有关设备,实验室的李和平研究员等在组装样品、实验结果讨论等方面给予了我们大力帮助与有益启发,在此向他们表达我们最诚挚的谢意。中国地质科学院地质力学研究所的胡键民研究员不辞辛苦,帮助我们在阴山地区采集样品,并对样品进行了相关分析,对此我们表示衷心感谢。

References:

[1] Gaillard F. Laboratory Measurements of Electrical Conductivity of Hydrous and Dry Silicic Melts under Pressure [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 218(1/2): 215-228.

[2] Duba A. Electrical Conductivity of Olivine [J]. J Geophys Res, 1972, 77(14): 2483-2494.

[3] Haak V. A Comparison of the Electrical Conductivity of Natural Mono and Polycrystalline Olivines—A Case to Decide [A]//Schreyer W. High-Pressure Researches in Geoscience [C]. Stuttgart: E Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1982: 407-417.

[4] Constable S, Duba A. Electrical Conductivity of Olivine, a Dunite, and the Mantle [J]. J Geophys Res, 1990, 95(B5): 6967-6978.

[5] Tyburczy J A, Roberts J J. Low Frequency Electrical Response of Polycrystalline Olivine Compacts: Grain Boundary Transport [J]. J Geophys Res, 1990, 17(11): 1985-1988.

[6] Roberts J J, Tyburczy J A. Frequency Dependent Electrical Properties of Polycrystalline Olivine Compacts [J]. J

Geophys Res,1991,96(B10):16205-16222.

[7] Liu J L,Bai W M,Kong X R. Research on Electrical Properties of Rock at High Pressure and Temperature [J]. Acta Seismologica Sinica,1999,21(1):89-97. (in Chinese)
柳江琳,白武明,孔祥儒. 高温高压下岩石的电性研究 [J]. 地震学报,1999,21(1):89-97.

[8] Fuji-ta K,Katsura T,Tainosho Y. Electrical Conductivity Measurement of Granulite under Mid-to Lower Crustal Pressure-Temperature Conditions [J]. Geophys J Int,2004,157(1):79-86.

[9] Sato H,Ida Y. Low Frequency Electrical Impedance of Partially Molten Gabbro:The Effect of Melt Geometry on Electrical Properties [J]. Tectonophysics,1984,107(1/2):105-134.

[10] Roberts J J,Tyburczy J A. Partial-Melt Electrical Conductivity:Influence of Melt Composition [J]. J Geophys Res,1999,104(B4):7055-7065.

[11] Partzsch G M,Schilling F R,Arndt J. The Influence of Partial Melting on the Electrical Behavior of Crustal Rocks:Laboratory Examinations,Model Calculations and Geological Interpretations [J]. Tectonophysics,2000,317(3-4):189-203.

[12] Gardien V,Thompson A B,Grujic D,et al. Experimental Melting of Biotite+Plagioclase+Quartz±Muscovite Assemblages and Implications for Crustal Melting [J]. J Geophy Res,1995,100(B8):15581-15591.

[13] Wu Z X,Deng J F,Wyllie P J,et al. Dehydration-Melting Experiment of the Biotite-Gneiss,Eastern Hebei,at 1 GPa Pressure [J]. Scientia Geologica Sinica,1995,30(1):12-17. (in Chinese)
吴宗絮,邓晋福,Wyllie P J,等. 冀东黑云母片麻岩在 1 GPa 压力下脱水熔融实验 [J]. 地质科学,1995,30(1):12-17.

[14] Yang X S,Jin Z M,Huenges E,et al. Experimental Study on Dehydration Melting of Natural Biotite-Plagioclasegneiss from Himalayas and Implications for Himalayan Crust Anatexis [J]. Chinese Science Bulletin,2001,46(10):867-872. (in Chinese)
杨晓松,金振民,Huenges E,等. 高喜马拉雅黑云斜长片麻岩脱水熔融实验:对青藏高原地壳深熔的启示 [J]. 科学通报,2001,46(3):246-250.

[15] Fuji-ta K,Katsura T,Matsuzaki T,et al. Electrical Conductivity Measurement of Gneiss under Mid-to Lower Crustal p-T Conditions [J]. Tectonophysics,2007,434(1):93-101.

[16] Macdonald J R. Impedance Spectroscopy,Emphasizing Solid Materials and Systems [M]. New York:John Wiley & Sons,1987:1-26.

[17] Huebner S J,Dillenaurg G D. Impedance Spectra of Dry Silicate Minerals and Rock:Qualitative Interpretation of Spectra [J]. Am Miner,1995,80(1-2):46-64.

[18] 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.

[19] Roberts J J,Tyburczy J A. Frequency Dependent Electrical Properties of Dunite as Function of Temperature and Oxygen Fugacity [J]. Phys Chem Minerals,1993,19(8):545-561.

[20] Skjerlie K,Johnston A D. Fluid-Absent Melting Behavior of an F-Rich Tonalitic Gneiss at Mid-crustal Pressures:Implication for the Generation of Anorogenic Granites [J]. J Petrology,1993,34(4):785-815.

[21] Patiño Douce A E,Johnston A D. Phase Equilibria and Melt Productivity in the Politic System:Implications for the Origin of Peraluminous Granitoids and Aluminous Granulites [J]. Contrib Miner Petrol,1991,107(2):202-218.

[22] Waff H S. Theoretical Considerations of Electrical Conductivity in a Partially Molten Mantle and Implications for Geothermometry [J]. J Geophys Res,1974,79(26):4003-4010.

[23] Waff H S,Weill D F. Electrical Conductivity of Magmatic Liquids:Effects of Temperature,Oxygen Fugacity and Composition [J]. Earth Planet Sci Lett,1975,28(2):254-260.

[24] Rai C S,Manghnani M H. Electrical Conductivity of Basalts to 1 550 ℃ [A]//Dick H J B. Magma Genesis [C]. Portland:Bull 96 Oregon Dept Geol Miner Ind,1977:219-237.

[25] Rai C S,Manghnani M H. Electrical Conductivity of Ultramafic Rocks to 1 820 Kelvin [J]. Phys Earth Planet Inter,1978,17(1):6-13.

[26] Behrens H. Na and Ca Tracer Diffusion in Plagioclase Glasses and Supercooled Melts [J]. Chem Geol,1992,96(3-4):267-275.

[27] Henderson P, Nolan J, Cunningham G C, et al. Structural Controls and Mechanisms of Diffusion in Natural Silicate Melts [J]. Contrib Miner Petrol, 1985, 89(2/3): 263-272.

Experimental Study on Electrical Conductivity of Biotite- and Plagioclase-Bearing Gneiss at High Temperature and High Pressure

HUANG Xiao-Ge[1], BAI Wu-Ming[1], ZHOU Wen-Ge[2]

(1. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*;
2. *Institute of Geochemitry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550002, *China*)

Abstract: We have investigated the electrical properties of rock sample from Yinshan orogenic zone by *in situ* complex impedance spectroscopy using a multianvil apparatus. The electrical conductivity was measured at pressure of 1 GPa and temperature from 250 ℃ to 1 100 ℃ at frequencies from 0.1 Hz to 1 MHz. The data of resistance were obtained by using an equivalent circuit fitting technique. From these measurements we determined the electrical conductivity of the Archean metamorphic biotite- and plagioclase-bearing gneiss. The experimental results indicate that (1) each spectrum consists of an almost semicircular high-frequency arc Ⅰ and a depressed high-frequency arc Ⅱ. The impedance spectrum Ⅰ is dominated by grain-interior response; the impedance spectrum Ⅱ is dominated by the sample-electrode interface impedance. (2) Electrical conductivity displays Arrhenian behavior respectively over investigated temperature range from 250 ℃ to 700 ℃ and from 750 ℃ to 1 100 ℃. However, it rapidly increases from 700 ℃ to 750 ℃. This jump is due to dehydration-melting of biotite within sample based on the comparative analysis of SEM photoes and electron probe data for pre-run and post-run samples. (3) Over higher temperature range(750～1 100 ℃), sodium is the dominating charge carrier in partially molten samples. (4) The activation energy of biotite- and plagioclase-bearing gneiss is 0.53 eV over range of temperature from 250 ℃ to 700 ℃. However, the activation energy of partially molten sample is 1.41 eV over range of temperature from 750 ℃ to 1 100 ℃. This change of activation energy has relations with sodium content and mobility in melt. It is possibly due to the change of structure between mineral and melt within samples.

Key words: electrical conductivity; gneiss; activation energy; Yinshan orogenic zone