

大别超高压榴辉岩高温高压下 电导率实验研究

朱茂旭¹⁾ 谢鸿森¹⁾ 赵志丹²⁾ 郭捷¹⁾ 白武明³⁾

1) 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

2) 中国地质大学, 北京 100083

3) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101

[摘要] 为研究大陆中下地壳高导层成因及与物质组成之间的关系, 用模拟实验的方法在不同的温度、压力条件下分别测定了干的和 1mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩的电导率。结果表明, 干榴辉岩平行线理方向的电导率比垂直于线理方向的高, 但两个方向上的活化能相近。在中下地壳条件下, 干榴辉岩的电导率比中下地壳高导层电导率值低几个数量级。常温下 1mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩两个方向上的电导率对压力具有不同的依赖性; 在中下地壳条件下, 1mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩的电导率可达到一般高导层的电导率值。无论干的还是饱和的榴辉岩都不能解释大别山 20—50km 深处的高导层成因, 因此, 在该深度范围内榴辉岩不可能是主要的岩石组成

[关键词] 高温高压、榴辉岩、电导率、阻抗谱。

1 引言

高温高压下地球深部物质的物理性质研究是制约野外地球物理测量结果的解释、建立岩石圈物质组成剖面 and 结构的基础性研究^[1-3]。电导率测量是透视地球深部最有效的方法之一, 地壳物质的电导率对矿物组成、温度、压力、流体含量、孔隙度及固态高导相的存在有密切的联系^[4]。因此, 开展高温高压下地球深部物质电学性质的实验研究可为地壳组成和精细结构的研究提供重要信息, 还可为中下地壳普遍存在的高导层成因的微观物理机制的解释提供依据。目前高温高压下中下地壳部分岩石的电学性质数据已有所报道^[5-9], 但多数只是在高温高压下测定中下地壳干岩石的电导率, 而大多数干的地壳岩石在高温高压下的电导率不能解释中下地壳普遍存在的高导层成因; 或是在常温、常压至 250MPa 下测定流体饱和岩石的电导率。在高压高温下对中下地壳流体饱和岩石电导率实验研究较系统的当属 Glover 等^[3,10,11], 他们研究了在 200MPa、常温至 900℃ 和 0.5mol/L NaCl 溶液饱和的花岗岩、斜长角闪岩、麻粒岩和片麻岩的电导率。但以上提到

[收稿日期] 2000-04-26 收到, 2000-08-15 收到修定稿。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(49904005, 49672099, 49672142)。

[作者简介] 朱茂旭, 男, 1967 年生, 1996 年在中国地质大学获地球化学硕士学位, 1999 年在中国科学院地球化学研究所获理学博士学位。主要从事地球深部物质高温高压实验研究。E-mail: zhumaoxu@hotmail.com

的研究都是在较低的压力(小于 250MPa)下进行的,而且电导率数据都是在固定的频率下获得的,没有考虑电导率测量的频散效应。最近, Nover 等^[7,8]和 Siegesmund 等^[9]虽然讨论了压力和频率对 NaCl 溶液饱和的中下地壳岩石电导率测量的影响,并分析了其中的传导机制,但他们的实验也只在常温下进行。榴辉岩作为下地壳的重要组成物质之一,高温高压下电导率数据尚十分缺乏。本文在高温高压条件下,在 12—10⁵Hz 频率范围内分别测定了干的和 1mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩的电导率,并讨论了温度、压力、流体和频率对榴辉岩电导率的影响。

2 样品和实验方法

实验样品采自安徽省潜山五庙的新鲜含柯石英榴辉岩。矿物组成为:石榴石(45%)、绿辉石(45%);角闪石、白云母、石英等共占 10%。石榴石的颗粒大小范围为:(长轴:0.05mm,短轴:0.025mm)到(长轴:0.6mm,短轴:0.47mm),绝大多数颗粒在(长轴:0.05mm,短轴:0.025mm)到(长轴:0.5mm,短轴:0.3mm)之间。绿辉石的颗粒大小范围为(长轴:0.05mm,短轴:0.03mm)到(长轴:1.35mm,短轴:0.55mm)之间。绿辉石的长轴平行于线理,显微镜下观察发现,矿物没有蚀变,矿物颗粒边缘有孔隙(裂隙),主要沿线理方向分布。石榴石中发育有垂直线理方向的裂隙。榴辉岩的主要化学成分为:SiO₂(50.21%),TiO₂(0.07%),Al₂O₃(14.21%),Fe₂O₃(7.42%),FeO(2.88%),MnO(0.20%),MgO(7.9%),CaO(10.70%),Na₂O(2.90%),K₂O(0.25%),H₂O⁺(0.92%),H₂O⁻(0.09%),P₂O₅(0.07%)。从化学分析结果看,∑H₂O(即 H₂O⁺ + H₂O⁻)含量很低,仅为 1.01%。因按文献[12]中的方法对样品预处理后,样品中不含自由水(H₂O),所以实验体系中的“水”应为含水矿物中的 OH⁻和 H⁺脱水产物。从榴辉岩样品矿物组成来看,其中的含水矿物主要为角闪石和白云母,其总含量小于 10%,因此,其中的 OH⁻和 H⁺不会对于榴辉岩的电导率产生明显的影响,即使在较高温度下存在部分脱水时,因岩石中 OH⁻和 H⁺含量很低,部分脱水也不会严重影响岩石的电导率,因为此时脱水作用形成的自由流体的连通度会很低。岩石波速测量结果表明^[13],对干岩石(指不含自由水,以下同)来说,当压力大于 200MPa 后,岩石中的孔隙和裂隙基本闭合,因此,本实验在 1.0GPa 下测定干榴辉岩电导率时,裂隙和孔隙等都不会产生严重的影响,因此,在实验中对这些因素的影响可不作考虑;相反,孔隙或裂隙对水饱和岩石的电导率有很大的影响,特别是在较低压力下,这将在后面讨论。样品先按岩石组构分别制备成平行于线理和垂直于线理方向的、直径为 8.9mm 的圆柱,然后切割成高度为 3.5mm 和 8.6mm 的短圆柱各 2 个。高度为 3.5mm 的短圆柱用于干的条件下的电导率测定;高度为 8.6mm 的短圆柱用于 NaCl 溶液饱和条件下的电导率测定。用于干条件下电导率测定的样品的预处理及组装方法见文献[12]。用于 NaCl 溶液饱和条件下电导率测定的样品先在真空中用 1mol/L NaCl 溶液浸泡 48h 以上,实验前从溶液中取出,用吸湿纸吸去样品表面的水滴,然后马上装入聚四氟乙烯管中,管口用铜帽封住以防止水分散失,铜帽同时用作电极。最后置入叶蜡石传压介质中开始实验。NaCl 溶液饱和的样品用聚四氟乙烯管作绝缘管,主

要是防止实验过程中饱和水的渗漏。聚四氟乙烯具有好的绝缘和传压性能,但当有水存在时,所能承受的最高温度为 500℃,因此,本实验中 NaCl 溶液饱和样品实验的最高温度为 500℃。

实验是在 YJ-3000 吨型压机上完成^[14]。干样品的电导率测定实验方法见文献^[12]。实验压力 P 均为 1.0GPa,温度为 300—850℃;测量的频率范围为 12—10⁵ Hz,测量的频率点为 38—45 个。1mol/L NaCl 溶液饱和的样品先在常温、不同压力(50—1000MPa)下测定电导率,压力间隔为 100MPa。在每个测量点保持足够长时间后(30—60min),然后用 ZL5 型智能 LCR 测量仪(上海仪器研究所生产)同时测定模 $|Z|$ 和相角 θ 。当在 5min 内所测的模的相对误差在 1.5% 以内时,认为达到了平衡,开始在 12—10⁵ Hz 频率范围内分别记录 10 个均匀分布的不同频率点的模和相角。当压力达到 1.0GPa 后开始加温,从 50℃ 开始记录数据,升温间隔为 50℃,直到 500℃ 为止。干样品和 NaCl 溶液饱和的样品都分别测定了平行于线理和垂直于线理两个方向的电导率。

3 实验结果

用交流电测定硅酸盐矿物的电导率时,电导率对频率存在明显依赖性,即频散效应,这一现象已为许多实验所证实^[7,8,15]。在这种情况下需要确定样品的直流电阻 R ,然后用 R 来计算电导率 σ

$$\sigma = (d/s)/R, \quad (1)$$

式中 d/s 为几何因子, d 为样品厚度, s 为电极截面积。确定直流电阻 R 的有效方法为阻抗谱法^[16],本实验采用该方法。在 12—10⁵ Hz 范围内测定的结果表明,无论是干的样品,还是 NaCl 溶液饱和的样品,其电导率都存在明显的频散效应,在阻抗谱上表现为半圆弧。本文的电导率计算都是利用阻抗谱法的复数非线性最小二乘法(CNLS)拟合出电阻 R (即半圆弧的直径),然后按(1)式计算。

3.1 高温高压下干榴辉岩的电导率

图 1 为干样品在 1.0GPa、不同温度下的阻抗谱图(Z_R 为实部, Z_I 为虚部)。平行于线理和垂直于线理方向上的阻抗谱相似,都表现出半圆弧。随温度升高,半圆弧的直径逐渐减小,这与半导体的电导率随温度的升高而增大的特征一致。CNLS 拟合结果表明,所有圆弧都为通过原点的半圆,利用(1)式计算所得的电导率 σ 与 $1/T$ 的关系如图 2。由图 2 可见,当温度高于 560℃ 时,电导率 $\log\sigma$ 与 $1/T$ 具有良好的线性关系,即符合 Arrhenius 公式

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E/k_B T), \quad (2)$$

式中 σ_0 为指前因子, ΔE 为活化能, k_B 为 Boltzmann 常数, T 为热力学温度。但当温度低于 560℃ 时,平行于线理方向测定的两个点明显不在同一直线上,而是比相应温度下趋势线值偏高。这是由于在较低温度时,榴辉岩的电导率很低,几乎与样品绝缘管的电导率相当,从而导致严重漏电所致。随温度升高,样品的电导率增大,样品管的漏电就可忽略,所测得的电导率基本反映了样品本身的电导率(垂直线理方向未在低温下测定)。在线性拟合时剔除低温下的两个点后拟合的结果分别为

$$y = -0.77273x + 5.244, \quad (\text{平行线理方向}) \quad (3)$$

$$y = -0.77004x + 4.533, \quad (\text{垂直线理方向}) \quad (4)$$

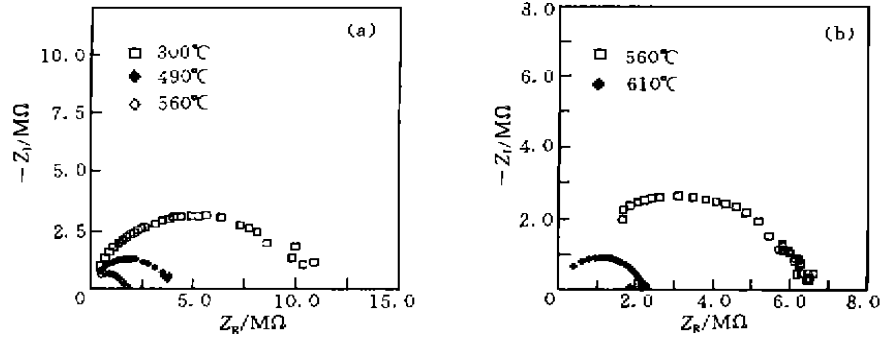


图 1 不同温度下平行于线理方向(a)和垂直于线理方向(b)的阻抗谱($P=1.0\text{GPa}$)

Fig. 1 The impedance spectroscopy of eclogites (a) Parallel to lineation and (b) Perpendicular to lineation at 1.0 GPa and various temperatures

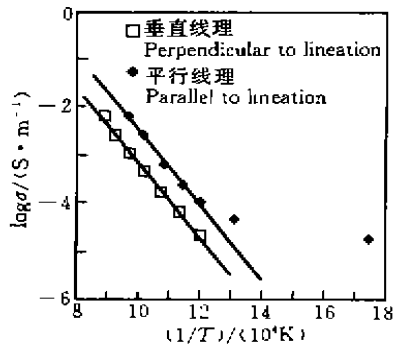


图 2 1.0GPa 和 300—850℃ 下 $\log\sigma$ 与 $1/T$ 的关系图

Fig. 2 The relationship between $\log\sigma$ and $1/T$ at 1.0GPa and 300—850℃

式中, y 为 $\log\sigma$, x 为 $1/T$. 从拟合结果看, 平行线理方向和垂直线理方向的活化能 ΔE , 即斜率(分别为 -0.77273 和 -0.77004) 非常相近, 这暗示了在不同方向上的导电机制是相同的. 因活化能数值较小(小于 1.4eV), 且在较低的温度范围内, 可推断其传导机制为电子传导; 而离子传导的活化能一般较高, 且往往为较高温下(高于 1000℃) 的传导机制. 研究表明^[17], 对一些传导机制以电子传导为主的含变价元素如 Fe 等的矿物中, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的电子转移往往是其中重要的电子传导机制. 因此, $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e$ 的小极化子传导很可能是主要的传导机制. 在相同的温度下, 平行于线理方向的电导率比垂直于线理方向的高 0.66 个自然对数单位以下, 如在 560℃ 时相差

0.66 个自然对数单位, 在 650℃ 时相差 0.58 个自然对数单位, 表明在高温高压下榴辉岩的电导率存在各向异性. Zhao 等^[2] 和 Kern 等^[13] 在高压下测得大别超高压榴辉岩样品的波速都存在各向异性, 他们认为, 高压下榴辉岩波速的各向异性是由主要矿物绿辉石在线理方向上强的晶格择优取向引起的. 本实验用样品与 Zhao 等^[2] 的为同一套样品, 我们有理由相信本实验样品中绿辉石也会有较强的晶格择优取向, 因此, 榴辉岩的电导率各向异性也应由绿辉石的晶格择优取向决定的, 这意味着在以榴辉岩为主的深部地壳必然也会存在电导率和波速的横向和纵向的各向异性.

3.2 常温高压下 1mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩的电导率

一般认为^[3], 地壳内流体 NaCl 的浓度在 0.5—5mol/L 之间. 本实验用 1mol/L NaCl 溶液来饱和榴辉岩样品. 图 3 为常温, 0.05—1.0GPa 范围内不同压力下的阻抗谱图, 经

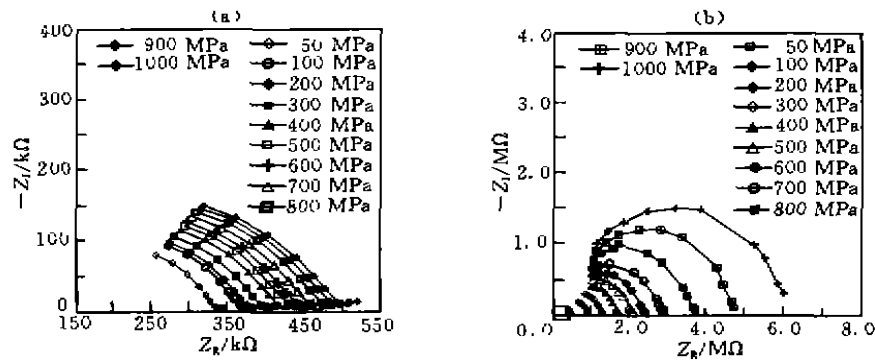


图3 0.05—1.0GPa 范围内不同压力下的阻抗谱图

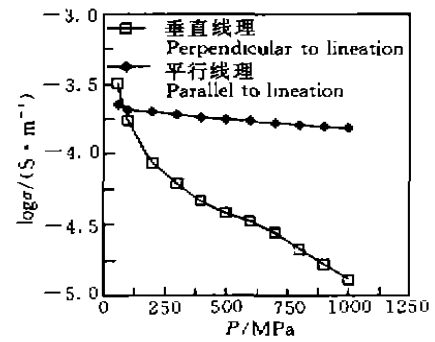
(a) 平行于线理; (b) 垂直于线理.

Fig. 3 The impedance spectroscopy at various pressures between 0.05 and 1.0GPa

拟合后都为经过原点的圆弧. 从图3可看出,垂直线理方向的阻抗谱比平行线理方向的完整,且实部(Z_R)和虚部(Z_i)都比平行线理方向的大,这说明在垂直线理方向极化程度更大,因此,也反映了孔隙流体的连通性较平行线理方向的差^[9],这可能与石榴石中垂直裂隙的连通性差有关. 随压力的增大,两方向上圆弧的直径,即电阻 R 逐渐增大,垂直线理方向上的圆弧越来越完整,表明随压力的增大,裂隙几何形态及流体的连通性发生了较大的变化;平行线理方向的圆弧形状变化不大,表明随压力的增加,裂隙几何形态和流体的连通性只发生较小的变化. 经 CNLS 拟合和计算得到的电导率与压力的关系如图4所示.

3.3 高温高压下 1mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩的电导率

图5为1.0GPa、不同温度下 NaCl 溶液饱和的样品的阻抗谱. 在相近温度下,垂直线理方向上的圆弧比平行线理方向上的圆弧更完整,这与常温高压下的阻抗谱特征(图3)一致,经 CNLS 拟合都为通过原点的圆弧. 与干样品相似,随温度的升高,圆弧的直径逐渐减小. 电导率 $\log\sigma$ 与温度 T 的关系见图6. 由图6可见,在相同的温度下,平行线理方向的电导率比垂直线理方向的高1—2个数量级. 在200℃以下,平行线理方向的电导率随温度的增加而增大,在200—250℃之间出现一最大值,然后开始下降,这与高温高压下稀电解质溶液的电导率特征相似.

图4 常温下 1mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩的电导率 $\log\sigma$ 与压力 P 的关系Fig. 4 The relationship between $\log\sigma$ and pressure, P , for saturated eclogites with 1mol/L NaCl solution at room temperature

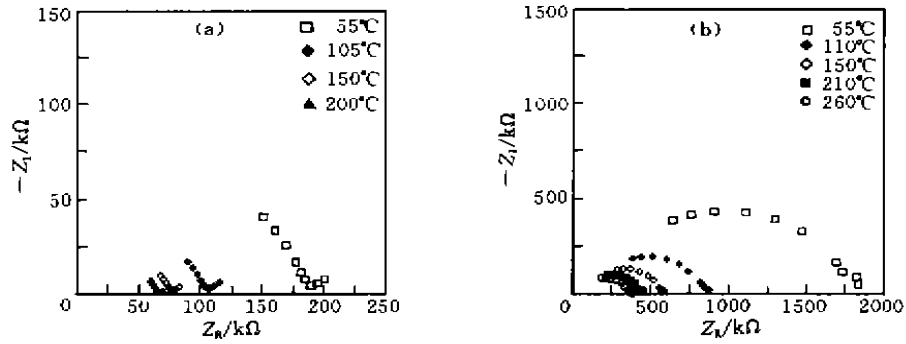


图 5 不同温度下 1mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩的阻抗谱

(a) 平行线理方向;(b) 垂直线理方向

Fig. 5 The impedance spectroscopy of saturated eclogites with 1 mol/L NaCl solution at various temperatures

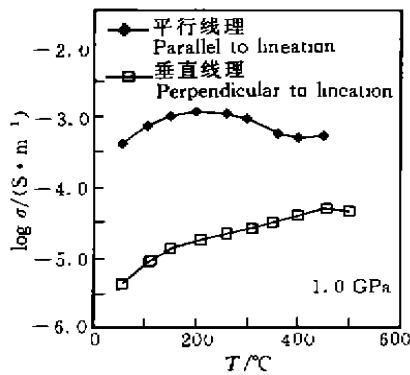


图 6 不同温度下 1mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩的电导率 σ 与温度 T 的关系

Fig. 6 The relationship between electrical conductivity, σ , and temperature, T , for eclogites saturated with 1mol/L NaCl solution

4 讨 论

由图 4 可见,在压力作用下饱和榴辉岩两个方向上的电导率都减小. 这属于 Shankland 等^[6]划分的常温下饱和岩石电导率的“正常压力效应”,即在压力作用下,样品中的微裂隙或孔隙不断闭合,孔隙中的流体呈孤立液囊,减小了离子传导路径的连通度,使电导率下降. 这种压力效应也表明,矿物颗粒边缘不存在明显的固态高导相(如石墨、钛铁矿和磁铁矿等)的电子传导. 因为如果矿物颗粒边缘存在固态高导相,在压力作用下,虽然以离子传导为主的流体连通性减小,但裂隙闭合可使颗粒边缘固态高导相的连通度增加,这会抵消离子传导的降低,因此,压力的继续作用会使电导率增大. 从图 4 还可看出,在压力作用下,垂直线理方向上的电导率下降速率比平行线理方向的快得多,造成这种现象

的原因可能与压力作用下不同方向下裂隙或孔隙闭合的难易程度的差异等有关. 样品内部平行线理和垂直线理方向上的裂隙或孔隙具有不同的结构和轴向比. 在不存在固态高导相的情况下,流体饱和的样品的电导率主要由平行于电场方向上连通性好的长裂隙中流体的离子传导为主. 在等静压作用下,垂直线理方向上的裂隙或孔隙更容易闭合^[9],流体的连通性下降更快,因此电导率下降更快. 这类裂隙很可能是镜下观察到的石榴石中的垂直微裂隙.

研究表明^[18],在所有实验研究的压力范围内(小于 1.0GPa),从室温至 250℃,随温度

升高,0.1mol/L NaCl 溶液因流体黏度减小,离子活动性增大,溶液的电导率增大;当温度大于 250℃,电导率对温度变得不太敏感,当接近 350℃ 时出现一最大值,然后开始下降。这是由于流体密度进一步减小,离子配对程度增加,这两方面的因素都会降低溶液载流子的密度,导致电导率下降^[19]。1mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩平行线理方向的电导率(图 6)与 0.1mol/L NaCl 溶液电导率特征的这种相似性可能暗示着:在 1.0GPa 压力下,平行线理方向的电导率仍由流体的电导率特征决定。值得注意的是,我们得到的电导率最大值的温度比 Glover 等^[11]用 0.5mol/L NaCl 溶液饱和的部分岩石电导率出现最大值的温度要低,这可能与电解质溶液的浓度有关,因为 Llera 等^[20]对用 KCl 溶液饱和的岩石的电导率测量表明,电解质溶液的浓度越大,出现电导率最大值时的温度就越低。与平行于线理方向不同,垂直于线理方向的电导率随温度的升高却一直增大。与平行线理方向的电导率特征相类比可知,垂直于线理方向电导率的一直增大不是来自于流体,而是来自于矿物本身的电子传导的贡献,这与 Glover 等^[11]得到的饱和基性岩的电导率特征相同。然而,Glover 等^[11]的实验表明,只有 NaCl 溶液饱和的酸性岩石的电导率随温度增大才会出现最大值点,饱和的基性岩石不出现最大值点,而是一直增大。而我们的结果为:平行于线理方向上的电导率具有饱和酸性岩的特征,垂直于线理方向的电导率具有与饱和基性岩相同的特征,这与 Glover 等^[11]的结论不完全一致。造成这一差别的原因目前还不十分清楚,可能与流体浓度、裂隙结构及闭合程度以及高温下矿物的弱化程度等因素有关。其中可能的解释为:在平行线理方向上,孔隙闭合程度稍低,流体的连通性较好,传导仍以流体为主,在高温下流体的离子传导掩盖了矿物本身的电子传导;在垂直线理方向上,孔隙闭合程度大,流体的连通性大大减小,流体传导减弱,高温下矿物本身的电子传导开始显现出来。

结合我们的实验结果和 Glover 等^[3,11]的分析,可以得到如下结论:在 1.0GPa 和室温至 500℃ 条件下,1mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩平行线理方向的电导率主要由流体溶液的电导率特征及孔隙连通性有关的离子传导为主;而垂直线理方向上,当温度在 250℃ 以下时,具有平行线理方向的特征,高于 250℃,电导率的继续增大可能来自于矿物本身的电子传导。与常温高压下平行于线理和垂直于线理方向上的电导率之间的差异相似,高温高压下两个方向上的电导率差异可能仍然与两个方向上的孔隙闭合程度的差异、流体连通性差异及高温下岩石的弱化程度的差异等有关。从实验结果来看,在以榴辉岩为主的深部地壳中,无论含水与否,都可能存在电导率在横向和纵向上的各向异性,只是导致各向异性的原因不同。在干的条件下为矿物的择优取向所致,饱和岩石电导率的各向异性则与岩石中的裂隙分布及压力作用下不同方向上裂隙闭合程度的差异有关。

近 25 年来的大地电磁测量结果表明^[4],在中下地壳存在全球性的高导层,其成因机理一直是地球物理学家研究的热点,并提出了几种机制,包括:①地壳深部的流体;②矿物颗粒边缘的固态高导相,如石墨、钛铁矿、磁铁矿、黄铁矿等;③矿物的脱水;④部分熔融等。

前人对干的中下地壳岩石的高温高压电导率测量表明^[11,21],在中下地壳温度、压力条件下,除颗粒边缘含连通性好的固态高导相的岩石外,几乎所有干的中下地壳岩石的电导率都比中下地壳高导层电导率值低几个数量级。然而,最近 Glover 等^[11]的实验证明,

高温高压下干的麻粒岩的电导率可达到下地壳的电导率值,因此,Glover等^[11]和Jones^[4]都认为中下地壳的高导层不能称之为“异常”,特定的岩石类型和流体的结合可能控制着高导层的产生及形成深度。

我们的实验证明,干的榴辉岩在大别山中下地壳温度、压力条件下^[1]的电导率比典型的中下地壳高导层电导率(0.005—0.1S/m)低几个数量级,比大别山20—50km深处的高导层^[22](40—50Ωm)的电导率更低。因此,至少我们可以认为,颗粒边缘不含固态高导相的干榴辉岩不能解释这一高导层成因。1mol/L NaCl溶液饱和的平行于线理方向上的电导率达到了一般中下地壳电导率值(0.005—0.1S/m),似乎可以解释一般中下地壳高导层成因,但仍比大别山20—50km深处的高导层低2个数量级;而垂直线理方向上的电导率更低于大别山20—50km深处的高导层的电导率值。

值得注意的是,地壳深部,特别是下地壳物质的含水性一直是地球科学家们争论的问题,变质岩石学家一贯反对下地壳的高级变质岩是含水的。

我们的实验表明,无论含水与否,榴辉岩的电导率都不能解释大别山20—50km深处的高导层成因。因此,在该深度范围内,榴辉岩不可能是主要岩石组成,这与根据高温高压下大别山下地壳岩石波速测量所推测大别山下地壳组成的结论是一致的^[1,2,13],大别山下地壳榴辉岩的大量缺失主要是拆沉作用的结果^[1,13]。值得注意的是,以上结论是在榴辉岩中不含有石墨等固态高导相的前提下得到的,若含有石墨等高导相则要另当别论。目前越来越多的证据表明^[23],许多中下地壳岩石中都含有石墨等固态高导相,特别是在脆性剪切带中,因为在脆性剪切带中既有利于石墨的形成,又有利于石墨的连续分布^[24]。此外,在有水存在的条件下,水-碳相互作用也可能会大大地提高岩石的电导率。

至于大别山20—50km深处,跨度至少为300km(沿六合—瑞昌的长300km的地球物理剖面)的高导层成因目前尚未进行过详细的研究,高导层中是否含有石墨等固态高导相以及这一高导层的成因是否与大别山造山作用及随后的一系列地质作用有直接或间接的联系也是一个有待回答的问题。上面提到的4种机制中,矿物脱水和部分熔融似乎不太可能,因为这两种机制只在有限的范围内出现。而地壳深部流体和矿物颗粒边缘的固态高导相两种机制,特别是这两种机制的同时存在都有可能解释这一高导层成因。此外,根据Glover等^[11]的实验,在中下地壳温压条件下,含水的角闪岩相的电导率可达到这一高导层的电导率值,这与该地区目前出露的主要岩石类型一致^[1],因此,含水的角闪岩是其中合适的组成之一。然而,对于这一高导层的成因还有待进一步的研究。

德国 Bayreuth 大学 Bayerishes 地质研究所的徐有生博士提供了由 Bernard A. Boukamp 编写的阻抗谱分析程序,周文戈博士测定了矿物颗粒大小,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 高山,金振民,Kern H,等. 大别超高压榴辉岩高温高压下地震波速和密度的初步研究——对造山带地壳深部组成和莫霍面性质的启示. 科学通报,1997,42(8):862—866.
GAO Shan, JIN Zhen-Min, Kern H, et al. Seismic properties and densities of eclogites from Dabie ultrahighpressure metamorphic belt: implications for deep crustal composition and nature of the Moho. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 1997, 42(8):862—866.

- [2] Zhao Z, Xie H, Zhou W, et al. Compressional wave velocities in eclogites of the Dabieshan, Central China to 5.0 GPa: a preliminary result. In: Nakahara M ed. Rev High Pressure Sci. Technol., Proceedings of AIRAPT-16 & HPCJ-38, Vol. 7, 1998, 12—14.
- [3] Glover P W, Vine F J. Electrical conductivity of the continental crust. *Geophys Res Lett.*, 1993, 21(22): 2346—2350.
- [4] Jones A G. Electrical conductivity of the continental lower crust. In: Fountain D M, Arculus R J and W Kay R ed. Continental lower Crust, Amsterdam: Elsevier, 1992, 81—142.
- [5] 李立, 杨辟元, 殷波等. 东秦岭岩石层的地电模型. *地球物理学报*, 1998, 41(2): 189—196.
LI Li, YANG Pi-Yuan, DUAN Bo, et al. The lithospheric geoelectric model of east Qinling. *Chinese J Geophys.* (in Chinese), 1998, 41(2): 189—196.
- [6] Shankland T J, Duba A G, Mathez E A, et al. Increase of electrical conductivity with pressure as an indicator of conduction through a solid phase in midcrustal rocks. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(B7): 14640—14650.
- [7] Nover G, Heikamp S, Meurer H J, et al. In-suit electrical conductivity and permeability of mid-crustal rocks from the KTB drilling: consequences for high conductive layers in the Earth. *Surv. Geophys.*, 1998, 19: 73—85.
- [8] Nover G, Heikamp S, Kontny A, et al. The effect of pressure on the electrical conductivity of KTB rocks. *Surv Geophys.*, 1995, 16: 63—81.
- [9] Siegesmund S, Vollbrecht A, Nover G. Anisotropy of compressional wave velocities, complex electrical resistivity and magnetic susceptibility of mylonites from the deeper crust and their relation to the rock fabric. *Earth Planet. Sci Lett.*, 1991, 105: 247—259.
- [10] Glover P W, Vine F J. Electrical conductivity of carbon-bearing granulite at raised temperatures and pressures. *Nature*, 1992, 350: 723—726.
- [11] Glover P W, Vine F J. Beyond KTB—electrical conductivity of the deep continental crust. *Surv. Geophys.*, 1995, 16: 5—35.
- [12] 朱茂旭, 谢鸿森, 郭捷等. 高温高压下蛇纹石电导率实验研究. *科学通报*, 1999, 44(11): 1198—1202.
ZHU Mao-Xu, XIE Hong-Sen, GUO Jie, et al. Electrical conductivity measurement of serpentine at high temperature and pressure. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 1999, 44(11): 1198—1202.
- [13] Kern H, Gao S, Jin Z, et al. Petrophysical studies on rocks from the Dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt, Central China: implications for the composition and delamination of the lower crust. *Tectonophysics*, 1999, 301: 191—215.
- [14] 谢鸿森等著. 地球深部物质科学导论. 北京: 科学出版社, 1997, 42—53.
XIE Hong-Sen. Introduction of the Earth's Interior Materials (in Chinese). Beijing: Science Press, 1997, 42—53.
- [15] Roberts J J, Tyburczy J A. Frequency dependent electrical properties of polycrystalline olivine compacts. *J. Geophys. Res.*, 1991, 98(B10): 16205—16222.
- [16] Macdonald J R, Johnson W B. Fundamentals of impedance spectroscopy. In: Macdonald J R ed. Impedance Spectroscopy. New York: Wiley & Sons, 1987, 1—26.
- [17] Hirsch L M, Shankland T J, Duba A G. Electrical conduction and polaron mobility in Fe-bearing olivine. *Geophys J. Int.*, 1993, 114: 36—44.
- [18] Quist A S, Marshall W L. Electrical conductances of aqueous sodium chloride solutions from 0 to 800°C and pressure to 4000 bar. *J. Phys. Chem.*, 1968, 72: 684—703.
- [19] Marshall W L, Frantz J D. Electrical conductance measurements of dilute, aqueous electrolytes at temperatures to 800°C and pressures to 3900 bars: Techniques and interpretations. In: Ulmer G and Barnes H L ed. Hydrothermal Experimental Techniques. New York: John Wiley, 1987, 261—382.
- [20] Llera F J, Sato M, Nakatsuka K, et al. Temperature dependence of the electrical resistivity of water-saturated rocks. *Geophysics*, 1990, 55(5): 576—585.
- [21] Shankland T J, Ander M E. Electrical conductivity, temperatures, and fluids in the lower crust. *J. Geophys. Res.*

- 1983, **88**(B11):9476—9484
- [22] 董树文, 孙先如, 张勇等. 大别山碰撞造山带基本结构. 科学通报, 1993, **38**(6):542—545.
DONG Shu-Wen, SUN Xian-Ru, ZHANG Yong, et al. The basic structures of the Dabieshan collision orogenic zone. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 1993, **38**(6):542—545.
- [23] Glover P W. Graphite and electrical conductivity in the lower continental crust: a review. *Phys Chem Earth*, 1996, **21**(4):279—287.
- [24] ELEKTG Group. KTB and the electrical conductivity of the crust. *J Geophys. Res.*, 1997, **102**(B8):18289—18305.

EXPERIMENTAL STUDIES ON ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE DABIE ULTRAHIGH-PRESSURE ECLOGITES AT HIGH PRESSURES AND HIGH TEMPERATURES

ZHU MAO-XU¹⁾ XIE HONG-SEN¹⁾ ZHAO ZHI-DAN²⁾ GUO JIE¹⁾ BAI WU-MING³⁾

1) *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*

2) *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

3) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

[Abstract] Electrical conductivity is measured for dry and saturated with 1M NaCl eclogites at various pressures and temperatures, which are prevalent in the mid and lower crust. The results show that the electrical conductivity of dry eclogites parallel to the lineation is higher than that perpendicular to the lineation, however the activation energies are similar along both directions. The conductivity of dry eclogites at conditions of the mid and lower crust is several orders of magnitude lower than that of average highly conductive layers (HCL). At room temperature, the dependence of the conductivity of saturated eclogites on pressure is different in directions parallel and perpendicular to the lineation. The conductivity of saturated eclogites at mid and lower crust conditions is in the range of values of average HCL. However, the electrical conductivity of eclogites, regardless dry or saturated, is even much lower than that of Dabieshan HCL at the depths between 20 and 50km beneath the surface, and therefore is not used to explain the genesis of this HCL. Thus eclogites are not the main rock type at such depths in Dabieshan area.

[Key words] High temperatures and high pressures, Eclogites, Electrical conductivity, Impedance spectroscopy.