

高温高压下斜长角闪岩弹性、电学性质及其地质意义

万方^{1,2}, 周文戈¹, 刘永刚¹, 范大伟^{1,2}, 谢鸿森¹

(1. 中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用地球化学实验室, 贵阳 550002;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:在1.0 GPa、室温至700℃条件下,分别采用超声波反射—投射法和阻抗谱法,测量了华北克拉通北缘绿泥石化斜长角闪岩的弹性波纵波速度和电导率。在常温、压力>0.35 GPa的条件下,斜长角闪岩的弹性波纵波速度与压力呈线性关系,说明此时岩石中的微裂隙已经基本闭合。依据该线性关系,得到常温常压下斜长角闪岩的弹性波纵波速度为6.3907 km/s,压力系数为0.1606 km/(s·GPa)。在1.0 GPa条件下,斜长角闪岩的弹性波纵波速度与温度呈线性关系,温度系数为-0.000594 km/(s·℃)。在1.0 GPa、200~700℃条件下,斜长角闪岩样品的电导率符合Arrhenius公式,指前因子为25.78~105.32 S/m,活化能为0.57~0.66 eV。利用实验获得的弹性波纵波速度及其温度系数和压力系数以及电导率与温度的关系,结合现今华北克拉通地壳学的基本参数,计算得到斜长角闪岩的弹性波纵波速度—深度剖面 and 电导率—深度剖面,将二者分别与华北克拉通北缘深部地壳的弹性及电性结构进行对比的结果表明:高温高压下绿泥石化斜长角闪岩的弹性波纵波速度与该地区中地壳速度相当,电导率介于中、下地壳范围内。综合来看,实验的绿泥石化斜长角闪岩有可能是组成现今华北克拉通北缘的中地壳岩石之一。

关键词:纵波速度;电导率;地壳结构;高温高压;斜长角闪岩

中图分类号: P588.12;P589

文献标识码: A

文章编号: 1000-7849(2008)06-0047-06

地球物理学为人们探测地球内部结构提供了重要信息,实验室内的模拟测量和野外的直接观测是地球物理学研究的重要方法,二者相辅相成。在探索大陆地壳结构方面,一方面从声学角度,实验地球物理学家在高温高压条件下测量了各类地壳岩石的弹性波速度,求得了各类岩石的弹性波速度—深度关系,并结合地震观测获得了弹性波速度—深度剖面,建立了弹性波速度的岩石—深度剖面;另一方面从电学角度,人们根据实验室内获得的高温高压下岩石的电导率,求得了各类岩石的电导率—深度关系,结合大地电磁测深获得了电导率—深度剖面,建立了电学的岩石—深度剖面。由于地球内部结构的复杂性,往往需要多种方法的综合应用。在以往的研究中,大多从单一的弹性波或电学角度探讨地壳结构^[1-3],而同时利用实验获得的弹性波速度—深度结构和电导率—深度结构与地球物理探测获得的相应剖面的对比来限定地壳结构的研究还不多见。为此,我们在最高压力1.0 GPa、最高温度700℃条件下测量了产于华北克拉通北缘的斜长角闪岩的弹性波速度和电导率,将实验室获得的斜长角闪岩弹性波速度—深度结构和电导率—深度结构与该地区地球物理探测获得的相应结构进行对比,以此为例来

说明同时利用弹性波速度和电导率,将实验室模拟测量和野外直接观测进行对比,可以更好地限定地球内部的物质结构。

1 实验

1.1 实验样品

实验样品(JN0305e)为河北张家口地区出露的绿泥石化斜长角闪岩。该样品呈深灰色,块状。主要组成(体积分数)为斜长石(45%)、绿泥石(25%)、角闪石(15%),少量辉石(5%),副矿物有磁铁矿(3%)、榍石(5%),其他(2%),粒度小于0.5 mm。全岩及主要矿物的化学成分见表1。全岩采用X荧光光谱仪(XRF)由中国科学院地质与地球物理研究所测试;矿物采用EMPA1600由中国科学院地球化学研究所测试。

将实验样品加工磨制成直径10.8 mm、高6.0 mm和直径6 mm、高4 mm,上下两个端面抛光平行的两种圆柱体,分别用于高温高压下弹性波速度和电导率测量实验。实验前,将样品先用丙酮浸泡2 h,然后在丙酮中用超声波清洗,最后放入烘箱于100℃条件下烘烤至少12 h,以除去吸附水。

收稿日期: 2008-03-05

编辑: 刘江霞

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJXC2-SW-N20);西部之光联合学者项目;国家重点基础研究发展计划项目(2005CB724400)

作者简介: 万方(1983—),男,现正攻读矿物学、岩石学、矿床学专业硕士学位,主要从事实验岩石学方向的研究。

表1 斜长角闪岩样品(JN0305e)的全岩及主要矿物主量元素成分

Table 1 Major element compositions of the amphibolite(JN0305e) and its main minerals $w_B/\%$

样点 品数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	LOI	总量
全岩	44.50	1.94	14.17	13.28(Fe ₂ O ₃)	0.21	5.81	7.26	4.73	1.30	0.79(P ₂ O ₅)	6.31	100.31
Hb 6	40.98±0.83	0.93±0.16	10.20±0.64	20.18±0.59	0.38±0.03	8.16±0.44	9.13±0.38	2.79±0.11	1.77±0.19	0.01±0.01	—	94.53±1.04
Pl 7	65.65±0.96	0.01±0.02	20.61±0.56	0.08±0.02	0.01±0.01	0.00±0.00	1.89±0.56	10.38±0.52	0.15±0.04	0.01±0.01	—	98.78±0.41
Ch 3	30.47±0.60	1.06±0.21	14.68±0.19	23.99±0.49	0.41±0.06	13.39±0.37	0.14±0.04	0.04±0.02	3.68±0.06	0.00±0.00	—	87.87±0.61

FeO* 为全铁; LOI 为烧失量; Hb. 角闪石; Pl. 斜长石; Ch. 绿泥石

1.2 实验方法

实验在中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用地球化学实验室的 YJ-3000 吨压机上进行。实验系统的详细介绍见文献[4]。样品室压力采用铜熔融曲线及石英-柯石英相变方法标定, 压力测量误差小于 1.5%^[5]。样品室的温度采用 NiCr-NiSi 热电偶测量, 温度测量误差小于 5℃, 温度测量结果未经过压力校正。在弹性波速度测量过程中, 样品室的温度梯度小于 20℃; 在电导率测量过程中, 样品室的温度梯度小于 10℃。实验过程中的氧逸度相当于 Mo-MoO₂ 缓冲剂控制^[6]。

岩石弹性波速度测量采用超声波反射-投射法^[7-8]。将 Panametric 公司的 5077PR 脉冲发生器与 Tek 公司的 TDS784A 数字示波器并联使用来接收反射和透射的超声波脉冲。弹性波速度测量的组装如图 1-A。将直径 10 mm、高 6 mm 的圆柱体样品上下各置一片 0.1 mm 厚的金属片(钼片), 装入壁厚 1 mm、高 6 mm 的叶蜡石套管中。两端采用直径 12 mm 的叶蜡石柱作为缓冲棒, 以使样品处于恒温区。加热器为不锈钢片, 传压介质为叶蜡石立方块, 所有叶蜡石部件均经过 700℃ 焙烧。

实验过程中, 首先以 4×10^5 Pa/s 的速率升压

至目标压力, 稳定 20 min 后, 再进行弹性波速度测定, 如此反复操作至压力到达 1.0 GPa 即完成了常温高压条件下的弹性波速度测定。随后在压力为 1.0 GPa 时, 以 10℃/s 的速率升温至所需温度, 恒温 10 min, 再进行弹性波速度测定, 如此反复操作至温度到达 700℃, 实验结束。

采用交流阻抗谱法测量样品的电导率, 仪器为 Sarltron-1260 阻抗谱分析仪, 测量方法与朱茂旭等^[9]、王多君等^[10]、白利平等^[11] 的类似, 样品组装如图 1-B。将直径 6 mm、高 4 mm 的圆柱体样品, 连同上下两端各一个 0.1 mm 厚的钼电极和直径 6 mm、高 6 mm 的 Al₂O₃ 缓冲棒装入内径 6 mm、外径 8.5 mm、高 16.2 mm、经过 900℃ 煅烧的 Al₂O₃ 套管中, 其外围绕上厚 0.02 mm 的钼箔放入内径 8.5 mm、外径 12 mm、高 16.2 mm、经过 700℃ 煅烧的叶蜡石管中。两端采用直径 12 mm、高 8 mm、经过 700℃ 煅烧的叶蜡石柱作为缓冲棒。传压介质为经过 700℃ 焙烧的叶蜡石立方块。

实验过程中, 首先以 4×10^5 Pa/s 的速率升压至 1.0 GPa, 稳定 20 min 后, 以 10℃/s 的速率升温至所需温度, 恒温 60 min, 再进行阻抗谱测量, 如此反复操作至温度到达 700℃, 实验结束。

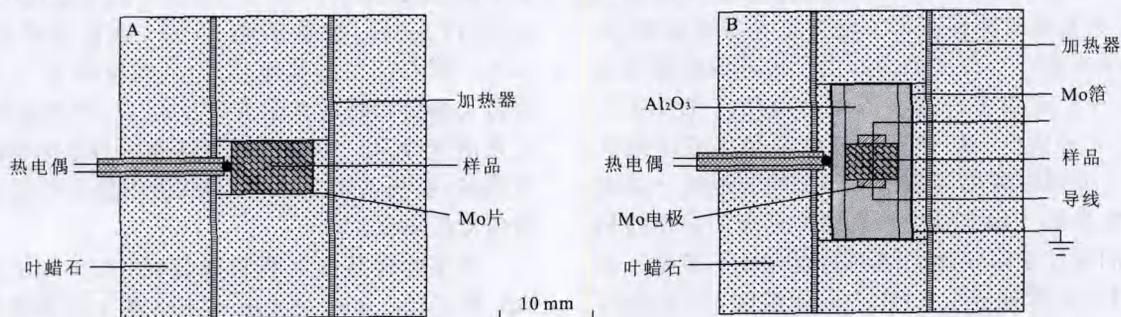


图1 实验组装图

Fig.1 Experiment assembly

A. 弹性波速度测量; B. 电导率测量

2 斜长角闪岩的弹性波速度和电导率

2.1 弹性波纵波速度

实验测量的斜长角闪岩弹性波纵波速度随压力

和温度的变化关系如图 2 所示。从图 2-A 中可以看出, 当压力大于 0.35 GPa 时, 弹性波纵波速度与压力呈线性增加关系, 这表明在常温、0.35 GPa 条件下, 岩石中的微裂隙已经基本闭合。弹性波纵波速

度随压力的线性变化反映了岩石的本征性质。利用 0.35~1.0 GPa 压力段的弹性波纵波速度数据,对弹性波纵波速度-压力进行线性拟合,获得纵波速度(v_p)-压力(p)的线性关系式: $v_p = 0.160\ 6p + 6.390\ 7$,纵波速度的压力系数为 0.160 6 km/(s·GPa),在微裂隙闭合的情况下岩石在常温常压条件下的弹性波纵波速度为 6.390 7 km/s(表 2)。Kern 等^[1,12-13]在最高压力为 0.7 GPa 条件下获得的斜长角闪岩弹性波纵波速度的压力系数在 0.282~0.659 km/(s·GPa)之间,本次实验获得的纵波速

度的压力系数稍低于 Kern 等^[1,12-13]的数据。这可能是由于本次实验压力较高的缘故^[14]。

从图 2-B 中可以看出,随温度升高,弹性波纵波速度逐渐减小,二者亦基本呈线性关系。同样对弹性波纵波速度-温度进行了线性拟合,获得了斜长角闪岩弹性波纵波速度在压力为 1.0 GPa 时的温度系数(表 2)。与 Kern 等^[1,12-13]的实验结果相比,本次实验获得的温度系数(-0.000 594)小于他们获得的温度系数(-0.000 175~-0.000 338)。这可能是由于本次实验样品中含水矿物较多所致。

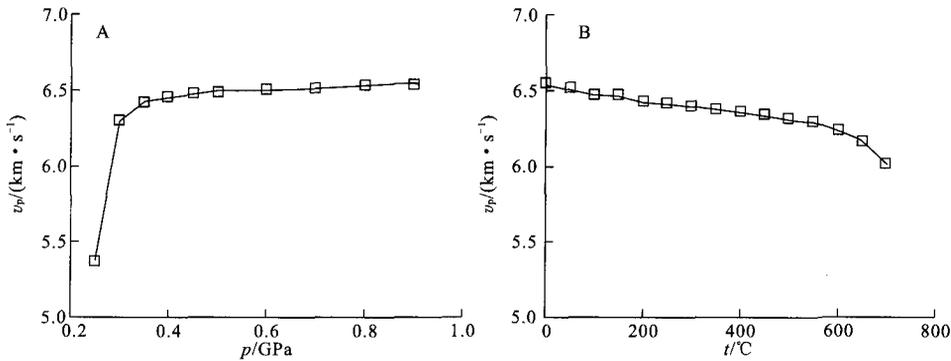


图 2 斜长角闪岩弹性波纵波速度随压力和温度的变化关系

Fig. 2 P-wave velocities in amphibolite with pressure and temperature

A. 室温条件下,弹性波纵波速度随压力的变化;B. 1.0 GPa 下,弹性波纵波速度随温度的变化

表 2 斜长角闪岩弹性波纵波速度的温度系数和压力系数

Table 2 Pressure and temperature coefficients of P-wave velocity in amphibolite

速度	$v(0)/$ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	压力系数 ($\partial v / \partial p$) _i / ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{GPa}^{-1}$)	压力 p/GPa	温度系数 ($\partial v / \partial t$) _p / ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)	温度 $t/\text{°C}$
v_p	6.390 7	0.160 6	0.35~1.00	-0.000 594	7~700

2.2 电学性质

在 1.0 GPa 条件下对斜长角闪岩样品进行了两次电导率实验(JN0305e-1 和 JN0305e-2),其结果基本一致,图 3 为其中一次实验的阻抗谱图。通过计算(计算方法与白利平等^[11]的类似),得到的实验样品的电导率与温度的变化关系如图 4 所示。从图 4 中可以看出,在 1.0 GPa 条件下,随温度升高(200

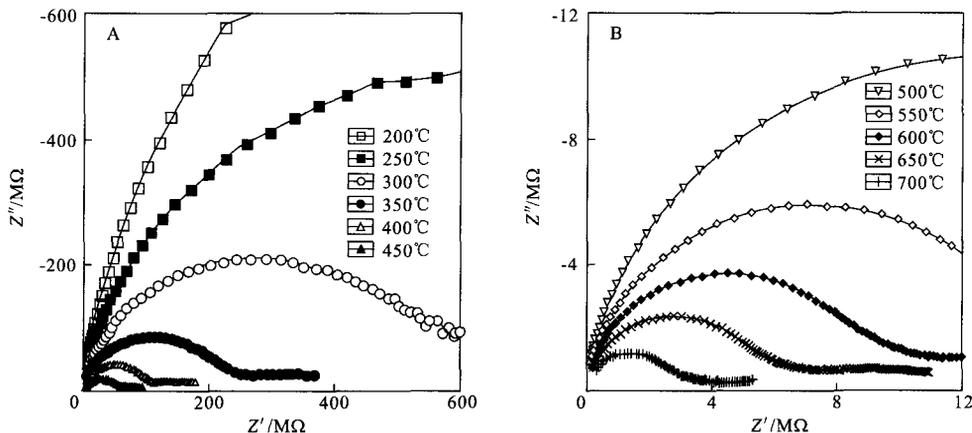


图 3 1.0 GPa、200~700°C 条件下斜长角闪岩岩石样品的阻抗谱图(JN0305e-1)

Fig. 3 Impedance spectra of amphibolite at 200-700°C, 1.0 GPa

A. 200~450°C 测量谱线; b. 500~700°C 测量谱线; Z', Z'' 分别是复阻抗的实部和虚部

~700℃),斜长角闪岩岩石样品的电导率逐渐增大,其电导率的对数值与温度的倒数呈线性负相关,符合 Arrhenius 公式:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right) \quad (1)$$

式中: σ 为电导率(S/m); σ_0 为指前因子(S/m); ΔE 为活化能(J/mol); k 为 Boltzmann 常数(J/K); T 为绝对温度(K)。

利用 Arrhenius 公式对实验数据进行了拟合,所得参数列入表 3。两次实验岩石样品的活化能 ΔE 相似,分别为 0.57 eV 和 0.66 eV。这与王多君等^[15]、白利平等^[11]发表的相同压力条件下辉长岩的活化能数据(分别为 0.67 eV 和 0.38 eV)比较接近。

表 3 斜长角闪岩电导率的指前因子和活化能

Table 3 Pre-exponential factor (σ_0) and activation energy (ΔE) of electrical conductivity for amphibolite

样品	p /GPa	T /K	σ_0 /(S·m ⁻¹)	ΔE /eV
JN0305e-1	1.0	473~973	25.78	0.57±0.02
JN0305e-2	1.0	473~973	105.32	0.66±0.02

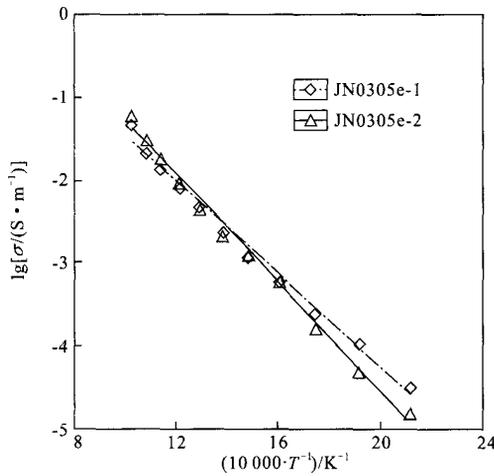


图 4 1.0 GPa 条件下斜长角闪岩岩石样品的 $\lg\sigma$ 与 $1/T$ 图解

Fig. 4 Relationship between $\lg\sigma$ and $1/T$ at 1.0 GPa for amphibolite

3 与地球物理资料的对比

3.1 与华北克拉通北缘深部地球物理资料的对比

目前已有许多学者利用地球物理手段分别从地热学、地震探测和大地电磁测深等方面研究了华北克拉通的内部结构^[16-20]。我们将实验获得的斜长角闪岩弹性波纵波速度—深度和电导率—深度剖面与野外地球物理方法获得的弹性波纵波速度—深度和电导率—深度结构进行对比,以此来讨论华北克拉

通北缘深部可能的岩石组成。

综合前人^[16]关于华北克拉通深部结构的研究成果,华北克拉通地壳分层结构和各层的物性参数列于表 4。

表 4 华北克拉通地壳分层结构及物性参数^[16]

Table 4 Crustal layers structure and their parameters in the North China craton

编 号	厚度 z /km	生热率 A /($\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)	热导率 κ /($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	密度 ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	地层热流 q /($\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$)
1 沉积层	3	1.13	2.2	2.60	60
2 上地壳 (基底)	12	1.26	3.0	2.77	57
3 中地壳	10	0.86	2.8	2.88	42
4 下地壳	13	0.31	2.6	3.00	34

注:地表温度 $t_0=10^\circ\text{C}$

3.2 弹性波纵波速度对比

利用实验获得的常压下弹性波纵波速度以及弹性波纵波速度的温度系数和压力系数(表 2),依据公式(2)计算了斜长角闪岩的弹性波纵波速度随深度的变化:

$$v(z) = v(0) + \int_0^z [\partial v / \partial p]_p dp + (\partial v / \partial t)_p dt \quad (2)$$

式中: $p = \rho g z$, p 为压力(GPa), ρ 为岩石密度(10^3 kg/m^3), g 为重力加速度(m/s^2), z 为深度(m); $t = t_0 + z/\kappa \cdot (q_0 - A \cdot z/2)$, t 为温度($^\circ\text{C}$), t_0 为地表温度(10°C), κ 为岩石热导率 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], q_0 为地表热流 (mW/m^2), A 为岩石生热率 ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)。

图 5 为依据实验数据求得的斜长角闪岩弹性波

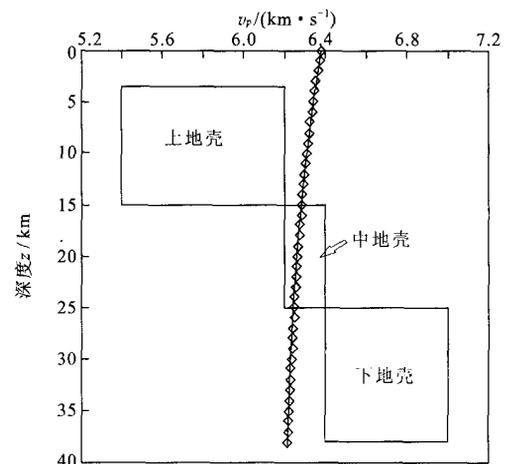


图 5 斜长角闪岩的弹性波纵波速度—深度剖面与华北克拉通北缘(张家口)地区地壳结构对比(各层地壳波速引自文献^[17-18])

Fig. 5 Comparison between the amphibolite P-wave velocity-depth profile and seismic structure for the crust of Zhangjiakou area

纵波速度—深度剖面,图中显示弹性波纵波速度随深度的增大略有减小。结合利用地震学方法获得的华北克拉通北缘的弹性波纵波速度—深度结构可以看出,实验的斜长角闪岩弹性波纵波速度曲线与该地区中地壳的波速范围相交。

3.3 电导率对比

在1.0 GPa的压力范围内,压力对电导率的影响非常小,因此,我们在此忽略压力对电导率的影响。依据实验获得的 Arrhenius 公式中的指前因子和活化能(表3),结合华北克拉通地温随深度的变化关系,求得斜长角闪岩的电导率随深度的变化剖面(图6)。图6中还给出了赵国泽等^[18]通过大地电磁测深获得的该地区现今的电导率—深度结构。可以看出,实验获得的斜长角闪岩电导率曲线与现今张家口地区中地壳及下地壳的电导率范围相交。

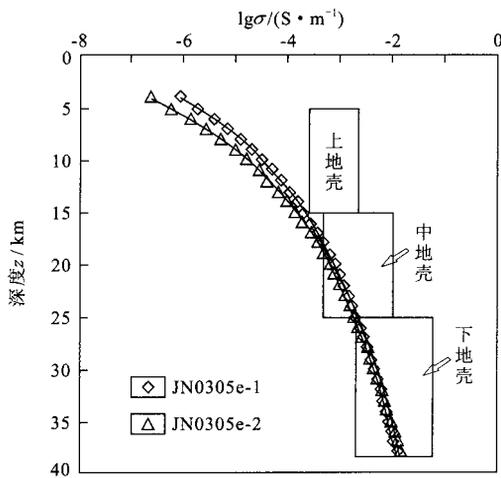


图6 斜长角闪岩的电导率—深度剖面与张家口地区地壳结构对比(各层地壳电性数据引自文献^[18])

Fig. 6 Comparison between the amphibolite electrical conductivity-depth profile and electromagnetic structure for the crust of Zhangjiakou area

综合以上弹性波纵波速度和电导率的对比结果,实验的绿泥石化斜长角闪岩在华北克拉通北缘中地壳的温压条件下,其弹性波纵波速度和电导率与通过野外地球物理测深获得的该地区中地壳的弹性波纵波速度和电导率相当,由此可以认为绿泥石化斜长角闪岩可能是组成现今华北克拉通北缘张家口地区中地壳的岩石之一。

4 结论

依据1.0 GPa、常温至700℃条件下获得的斜长角闪岩样品的弹性波纵波速度和电导率,计算求得斜长角闪岩弹性波纵波速度—深度剖面 and 电导率—

深度剖面,将它们与该地区地球物理测深获得的弹性波纵波速度—深度剖面 and 电导率—深度剖面进行了对比。结果显示,高温高压下斜长角闪岩的弹性波纵波速度与华北克拉通北缘中地壳的速度相当,其电导率与该地区中地壳及下地壳的电导率范围相交。综合来看,绿泥石化斜长角闪岩有可能是组成现今华北克拉通北缘中地壳的岩石之一,即这种古老的岩石可能残存于该地区现今的中地壳之中。此次实验结果表明,同时利用弹性和电性的手段,比利用单一方法来限定地球内部的物质结构更加合理、准确。

参考文献:

- [1] Kern H, Gao S, Liu Q. Seismic properties and densities of middle and lower crustal rocks exposed along the North China Geoscience Transect[J]. *Ear. Plan. Sci. Lett.*, 1996, 139(3-4): 439-455.
- [2] 王椿镛, 丁志峰, 宋建立, 等. 大别造山带地壳 S 速度结构[J]. *地球物理学报*, 1997, 40(3): 337-346.
- [3] 周文戈, 谢鸿森, 赵志丹, 等. 哀牢山变质带元江—墨江剖面岩石的纵波速度特征及其地质意义[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(增刊): 48-54.
- [4] 谢鸿森, 张月明, 徐惠刚, 等. 高温超高压下测量岩石矿物弹性波速的新方法及其地学意义[J]. *中国科学: B 辑*, 1993, 23(8): 861-864.
- [5] Xu J, Zhang Y, Hou W, et al. Measurements of ultrasonic wave velocities at high temperature and high pressure for window glass, pyrophyllite, and kimberlite up to 1 400℃ and 5.5 GPa[J]. *High Temperature-High Pressure*, 1994, 26: 375-384.
- [6] Xu Y S, Poe B, Shankland T J, et al. Electrical conductivity of olivine, wadsleyite, and ringwoodite under upper-mantle conditions[J]. *Science*, 1998, 280: 1 415-1 418.
- [7] Liu Y G, Xie H S, Guo J, et al. A new method for experimental determination of compressional velocities in rocks and minerals at high-pressure[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, 17(12): 924-926.
- [8] 谢鸿森, 周文戈, 刘永刚, 等. 高压下岩石弹性波速度几种测量方法的比较实验研究[J]. *中国科学: D 辑*, 2002, 32(2): 121-127.
- [9] 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.
- [10] 王多君, 李和平, 刘丛强, 等. 高温高压下纯橄岩电导率的实验研究——藏南冷地幔的电导率证据[J]. *科学通报*, 2001, 46: 1 659-1 661.
- [11] 白利平, 杜建国, 刘巍, 等. 高温高压下辉长岩纵波速度和电导率实验研究[J]. *中国科学: D 辑*, 2002, 32(2): 959-968.
- [12] Kern H, Walther Ch, Flüh E R, et al. Seismic properties of rocks exposed in the Polar profile region—constraints on the interpretation of the refraction data[J]. *Precambrian Research*, 1993, 64: 169-187.
- [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 delamina-

- tion of the lower crust[J]. *Tectonophysics*, 1999, 301: 191—215.
- [14] 周文戈, 谢鸿森, 赵志丹, 等. 高压下测量岩石纵波速度的反射—透射法[J]. 地质科技情报, 2001, 20(3): 1—5.
- [15] 王多君, 刘丛强, 李和平, 等. 高温高压下干热辉长岩的阻抗谱研究[J]. 自然科学进展, 2002, 12: 426—429.
- [16] 迟清华, 鄢明才. 华北地台岩石放射性元素与现代大陆岩石圈热结构和温度分布[J]. 地球物理学报, 1998, 41(1): 38—48.
- [17] 聂文英, 祝治平, 张先康, 等. 穿过张家口—渤海地震带西缘的折射剖面所揭示的地壳上地幔构造与速度结构[J]. 地震研究, 1998, 21(1): 94—102.
- [18] 赵国泽, 刘国栋, 詹艳, 等. 张北—尚义地震区及其邻区地壳上地幔结构[J]. 地震地质, 1998, 20(2): 155—163.
- [19] 魏文博, 谭捍东, 金胜, 等. 华北中部岩石圈电性结构——应县—商河剖面大地电磁测深研究[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2002, 27(5): 645—650.
- [20] 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等. 华北地区大地电磁测深及岩石圈厚度讨论[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 762—772.

The Elastic and Electrical Properties for Amphibolite at High Temperature and High Pressure and Their Geological Implication

WAN Fang^{1,2}, ZHOU Wen-ge¹, LIU Yong-gang¹, Fan Da-wei^{1,2}, XIE Hong-sen¹

(1. *Laboratory of the Earth's Interior and Geofluid Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China*; 2. *Graduate School, CAS, Beijing 100049, China*)

Abstract: The P-wave velocity (v_p) and electrical conductivity of chloritic amphibolite are measured at 1.0 GPa, from room temperature to 700°C, using ultrasonic reflection-transmission combined method and impedance spectra method respectively. The sample comes from northern margin of the North China craton. At room temperature, when the pressure exceeding 0.35 GPa, the v_p of amphibolites has a linear relationship with pressure, which indicates the tiny gaps in the rock sample had been closed. Based on this relationship, the v_p of the amphibolite obtained is 6.390 7 km/s, and the pressure coefficient is 0.160 6 km/(s · GPa). At 1.0 GPa, the v_p of amphibolites has a linear relationship with the temperature, the temperature coefficient is $-0.000\ 594$ km/(s · °C). The conductivity of amphibolite can be fit to Arrhenius equation at 1.0 GPa and 200—700°C, the pre-exponential factor is 25.78—105.32 S/m and the activation energy is 0.57—0.66 eV. The P-wave velocity-depth profile and electrical conductivity-depth profile can be calculated from the experimental data and the fundamental geothermal parameters in northern margin of the North China craton. The comparison of the calculated results with the elastic and electrical structure of this area reveals that the v_p of amphibolite is approximately equal to the middle crust, the electrical conductivity of amphibolite intersects the range of the middle and lower crust in this area. With together, the chloritic amphibolites may be a kind of rocks making up the middle crust in northern margin of the North China craton.

Key words: P-wave velocity; electrical conductivity; crustal structure; high temperature and high pressure; amphibolite