

# 高温高压下纯橄榄岩电导率的实验研究: 改则-鲁谷冷地幔的电导率证据

王多君<sup>①</sup> 李和平<sup>①</sup> 刘丛强<sup>②</sup> 赵志丹<sup>③</sup> 莫宣学<sup>③</sup> 郭铁鹰<sup>③</sup> 苏根利<sup>①</sup> 丁东业<sup>①</sup>

①中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用实验室, 贵阳 550002; ②中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002;

③中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083. E-mail: duojunwang@sina.com

**摘要** 在 1.0~4.0 GPa 和 643~1093 K 下利用阻抗谱法测定了西藏纯橄榄岩的电导率, 实验结果表明, 该纯橄榄岩的活化焓均小于 0.9 eV, 可能为颗粒内部和颗粒边界同时参与的混合导电机制. 以实验结果为依据, 通过对西藏西部已有大地电磁测深资料(电导率-深度剖面)的反演得出: 青藏高原的改则至鲁谷一带存在冷地幔. 该结果从高温高压实验的角度为目前的冷地幔观点提供了有力的实验证据.

**关键词** 高温高压 纯橄榄岩 电导率 导电机制 冷地幔

青藏高原的隆升与岩石圈的结构和演化, 与壳、幔热结构和深部热状态有着不同程度的成因联系<sup>[1,2]</sup>. 橄榄石是上地幔的代表性矿物, 已有实验表明<sup>[3,4]</sup>, 高温高压下橄榄石及纯橄榄岩电导率与温度、压力、氧逸度和样品的化学组成及结构密切相关. 因此, 在高温高压下开展橄榄石及纯橄榄岩电导率的实验室就位测量, 必将为野外大地电磁测深结果的反演、探讨上地幔的热状态、传导机制、物质组成、相态变化、流体和熔体的形成与分布等提供重要的实验依据<sup>[5]</sup>.

迄今为止, 橄榄石及纯橄榄岩电导率的实验室就位测量大多采用直流法<sup>[5-7]</sup>和单频交流法<sup>[8,9]</sup>. 直流法中存在严重的样品极化问题; 在单频交流法中, 由于颗粒边界电容、样品-电极界面电容及两电极间电容的存在使得电导率对频率存在依赖性. 虽然 Xu 等人<sup>[10]</sup>最近将阻抗谱测量技术引入高温高压下人造多晶橄榄石及美国 San Carlos 橄榄石的电导率就位测量并获得成功, 且该方法目前在国际上已被认为是高温高压下固体地球物质电导率实验室就位测量中最先进的方法, 但迄今为止高温高压下天然纯橄榄岩的阻抗谱测量在国内外尚未见报道. 本文在 1.0~4.0 GPa 和 643~1093 K 下利用阻抗谱法在 12~10<sup>5</sup> Hz 频率范围内首次测定了西藏纯橄榄岩的电导率. 通过将实验结果与青藏高原西部野外大地电磁测深结果对比, 获得了西藏西部上地幔的热结构信息.

## 1 样品和方法

实验样品采自西藏仲巴县, 采样的纯橄榄岩露头

大小为 40 m × 20 m. 样品中橄榄石(分子式约为 Mg<sub>1.9</sub>Fe<sub>0.1</sub>SiO<sub>4</sub>)含量约为 98%, 尖晶石含量约为 2%. 等粒结构, 粒径(平均)0.60 mm. 样品化学成分(平均质量百分含量): SiO<sub>2</sub> 41.36%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.12%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.34%, FeO 3.52%, MgO 52.34%, CaO 0.95%, Na<sub>2</sub>O < 0.01%, K<sub>2</sub>O 0.02%, MnO 0.04%, TiO<sub>2</sub> < 0.01%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> < 0.01%, CO<sub>2</sub> 0.08%, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> 0.46%. 纯橄榄岩在实验前被研磨成直径 5.80 mm, 长 5.40 mm 的圆柱, 随之用丙酮浸泡以除去油污, 然后在 373~393 K 的温度下烘烤 12 h 以除去吸附水.

实验时按图 1 所示方式组装样品. 为避免实验过程中叶腊石传压介质脱水对测量结果的影响, 样品组装前将叶腊石立方块(32 mm × 32 mm × 32 mm)及叶腊石堵头在 773 K 下烧结. 绝缘管为氧化铝管, 置于加热器的中部以减少温度梯度的影响. 采用金属铜作电极, 其直径为 5.30 mm, 引线为双芯屏蔽线. 加热器为两层不锈钢片, 并接地以屏蔽外界电磁干扰. 温度用镍铬-镍铝热电偶测定, 热电偶紧靠纯橄榄岩, 样品温度的测量误差约为 ± 10 K.

实验在 YJ-3000 t 紧装式六面顶压机上完成, 该装置的详细介绍见文献[11]. 实验时先将压力(标定误差: ± 0.1 GPa)升到预定值, 然后加热升温, 每个温度点间隔 323 K, 且稳定足够长时间使体系达到平衡. 用 ZL-5 型智能 LCR 测量仪(测量精度: 0.05%)测量各个温度点在每一频率  $f$  下的模|Z|和相角  $\phi$ , 测量频率为 12~10<sup>5</sup> Hz, 在 33~38 个近均匀分布的频点进行测量, 电压为 1 V.

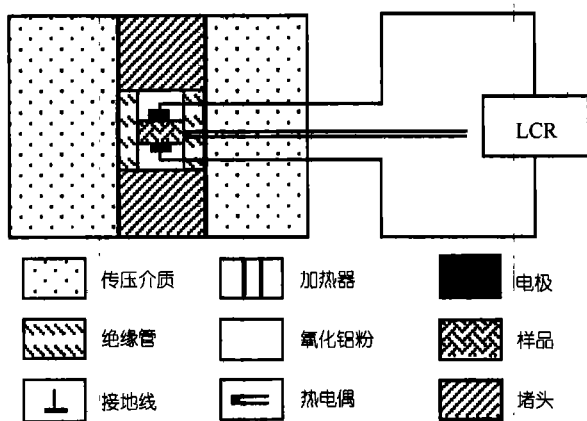


图1 样品组装剖面图

## 2 结果及讨论

本文进行了 1.0, 3.0 和 4.0 GPa 条件下纯橄岩的阻抗谱测量. 根据文献[12~14]的处理方法, 获得图 2 和表 1 结果. 由此表明: (1) 1.0, 3.0 和 4.0 GPa 条件下的  $\lg\sigma$  与  $1/T$  具有很好的线性关系(见图 2), 它们的相关系数的平方分别为 0.9210(图 2(a)), 0.9859(图 2(b))和 0.9752(图 2(c)), 3 个压力条件下的  $\lg\sigma$ -( $1/T$ ) 均满足 Arrhenius 关系式

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

其中  $\sigma_0$  为指前因子,  $k$  为 Boltzmann 常数,  $T$  为绝对温度,  $\Delta H$  为活化焓, Arrhenius 关系式拟合参数见表 1; (2) 在本实验的温度和压力下, 纯橄岩的活化焓都小于 0.9 eV, 并且随着压力的增大活化焓在不断的减小(见表 1); (3) 在本实验的温度、压力范围内只出现一种电传导机制.

本实验所获得的活化焓与 Xu 等人<sup>[10]</sup>的实验结果不同. Xu 等人<sup>[10]</sup>在 1273~1673 K 下获得橄榄石单晶和人造橄榄石多晶的活化焓在 1.66~1.73 eV 之间, 而本实验所获得的纯橄岩的活化焓在 0.4~0.9 eV 之

表 1 1.0, 3.0 和 4.0 GPa 下的纯橄岩电导率的 Arrhenius 关系式拟合参数

P/GPa	T/K	$\lg\sigma_0$	$\sigma_0/S \cdot m^{-1}$	$\Delta H/eV$
1.0	843 ~ 1103	-0.240	0.575	0.824
3.0	723 ~ 1023	-0.120	0.753	0.656
4.0	643 ~ 943	-1.344	0.045	0.470

间. 将 Xu 等人<sup>[10]</sup>的实验数据外推至本实验的温度和压力范围内, 结果发现他们的两种样品的电导率都低于本实验中样品的电导率. 产生这一差异的原因不应该是样品本身成分的差别. 已有研究结果表明<sup>[15,16]</sup>, 橄榄石中铁含量对其电导率具有重要的影响. 在高温高压下, 当其他条件相同时, 铁的含量越高, 电导率越大. Xu 等人<sup>[10]</sup>样品中铁含量明显高于本实验样品, 而事实上其实验结果恰好相反. 其次, 该差异更不应该由实验温度的不同引起. 已有的研究表明<sup>[17]</sup>, 橄榄石在不同温度区间确实具有不同的活化焓, 其中不同温度区间的活化焓随温度升高而增大. 但同一温度区间活化焓的压力效应一般为 0.01 eV/GPa, 而上述表 1 中的结果已明显超过此值. 因此, 该差异无法用实验温度的不同来解释. 我们认为, 造成本实验结果与 Xu 等人<sup>[10]</sup>结果差异的主要原因可能是颗粒边界效应. 在 Xu 等人的单晶样品中无颗粒边界效应, 而人造橄榄石多晶样品在短暂的实验时间内难以形成很厚的颗粒边界, 因此在 Xu 等人<sup>[10]</sup>的实验中样品的颗粒边界对电传导的贡献可以忽略. 事实上, Xu 等人<sup>[10]</sup>的单晶样品和多晶样品的电导率测量结果差别确实很小. 而本实验使用的却是天然的纯橄岩, 其经历了漫长的地质历史, 颗粒边界宽厚且不可避免地存在大量复杂的缺陷和杂质, 颗粒边界中大量复杂的缺陷和杂质的存在, 使得颗粒边界比颗粒内部具有更好的导电性, 颗粒边界的相互连通则在样品中形成了良好的导电网络, 从而

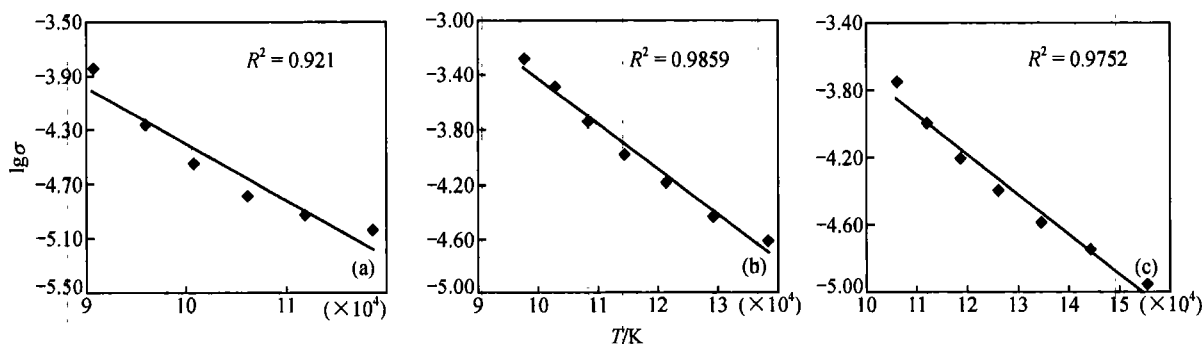


图 2 1.0(a)、3.0(b)和 4.0(c)GPa 下  $\lg\sigma$ -( $1/T$ )关系图

使得本实验结果与 Xu 等人<sup>[10]</sup>的结果存在上述差异。该差异从另外的角度反映了本实验中使用的天然纯橄岩样品的电传导,可能是由颗粒边界与颗粒内部同时参与的混合传导机制引起的。

### 3 地球物理启示

如前所述,纯橄岩的电导率与环境温度紧密相关,这就为利用大地电磁测深结果研究深部热状态提供了地球物理前提。西藏西部的改则地区至鲁谷地区以巨厚的岩石圈为特征,莫霍面深度为 71 km<sup>[1]</sup>。我们用 3.0 GPa 压力来模拟该区 84 km 深度(1.0 GPa 的压力代表 28 km 的深度)处所对应的上地幔。假设从莫霍面至 84 km 处上地幔是由干燥的纯橄岩组成,并且上地幔化学成分是均一的,在这样的条件下,影响电阻率(为对比方便,将电导率换算成电阻率)的主要外界因素即为温度,根据温度与电阻率的一一对应关系,我们可以从实验所获得的电阻率来反推上地幔的温度。当实验所获得的电阻率与大地电磁测深所获得的电阻率重合时,实验所获得的电阻率所对应的温度就代表 84 km 处上地幔的温度,最小的电阻率对应着最高的温度。青藏高原西部大地电磁测深探测结果<sup>[18]</sup>表明改则地区至鲁谷地区上地幔上部的电阻率大于 2000  $\Omega/m$ 。我们在 3.0 GPa 条件下所获得的电阻率中,1023 K 的电阻率为 1929.5  $\Omega/m$ ,与大地电磁测深结果的最小值重合。这就是说,要满足大地电磁测深所获得的电阻率大于 2000  $\Omega/m$  这一条件,84 km 处上地幔的温度就必须小于 1023 K。由于地温随深度递增,因此莫霍面处的温度必定小于 1023 K。由此,我们可以得出如下结论:从莫霍面至本实验所模拟的深度(84 km)范围内,上地幔的温度上限为 1023 K,低于正常地幔值,具有冷幔特征。这一结果与孔祥儒等人<sup>[1]</sup>的研究结果和地热研究结果<sup>[19]</sup>吻合。必须指出的是,上述反演结果是在假设上地幔不含水流体的情况下获得的。如果地幔岩孔隙中含有少量的水流体,电阻率则呈数量级降低,在此条件下,为满足大地电磁测深结果的上地幔上部电阻率大于 2000  $\Omega/m$  这一条件,84 km 处上地幔的温度上限更应比 1023 K 低。综上所述,借助于高温高压实验模型及对西藏西部上地幔上部大地电磁测深结果的反演表明,西藏西部的改则至鲁谷一带上地幔具有冷地幔特征。

**致谢** 易丽、左维硕士帮助完成了部分图件,朱茂旭博士、周文戈副研究员在实验过程中提出许多有益的建议,在此

一并致谢。本工作受国家“攀登”预选项目(95-预-39)、国家重点基础研究发展规划项目(G1998040800)和国家自然科学基金(批准号:49674221)资助。

### 参 考 文 献

- 1 孔祥儒,王谦身,熊绍柏. 青藏高原西部综合地球物理剖面和岩石圈结构与动力学. 科学通报, 1999, 44(12):1257 ~ 1265
- 2 沈显杰,朱元清,石耀霖. 青藏热流与构造热演化模型研究. 中国科学, B 辑, 1992, (3): 311 ~ 320
- 3 Hirsch L M. Occurrence of changes in electrical conduction of olivine arising from high temperature creep. J Geophys Res, 1989, 94(B12): 17861 ~ 17870
- 4 Wanamaker B J. Point defect diffusivities in San Carlos olivine derived from reequilibration of electrical conductivity following changes in oxygen fugacity. Geophys Res Lett, 1994, 21: 21 ~ 24
- 5 Kobayashi Y, Maruyama H. Electrical conductivity of olivine single crystals at high temperature. Earth and Planetary Science Letters, 1971, 11: 415 ~ 419
- 6 Bradley R S, Jamil A K, Munro D C. The electrical conductivity of olivine at high temperatures and pressures. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1964, 28: 1669 ~ 1678
- 7 Lacam A. Pressure and composition dependence of the electrical conductivity of iron-rich synthetic olivines to 200 kbar. Phys Chem Minerals, 1983, 9: 127 ~ 132
- 8 Cemic L, Will G, Hinze E. Electrical conductivity measurements on olivines  $Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$  under defined thermodynamic conditions. Phys Chem Minerals, 1980, 6: 95 ~ 107
- 9 Hirsch L M, Wang C Y. Electrical conductivity of olivine during high-temperature creep. J Geophys Res, 1986, 91(B10): 10429 ~ 10441
- 10 Xu Y S, Poe B T, Shankland T J, et al. Electrical conductivity of olivine, wadsleyite, and ringwoodite under upper-mantle conditions. Science, 1998, 280: 1415 ~ 1418
- 11 Xu J, Zhang Y, Hu W, et al. Measurements of ultrasonic wave velocities at high temperature and high pressure for windows glass, pyrophyllite, and kimberlite up to 1400°C and 5.5 GPa. High Temperature-High Pressure, 1995, 26: 375 ~ 384
- 12 Roberts J J, Tyburczy J A. Frequency dependent electrical properties of polycrystalline olivine compacts. J Geophys Res, 1991, 96(B10): 16205 ~ 16222
- 13 Huebner J S, Dillenburg R G. Impedance spectra of hot, dry silicate minerals and rock: Qualitative interpretation of spectra. American Mineralogist, 1995, 80: 46 ~ 64
- 14 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
- 15 Hirsch L M, Shankland T J. Quantitative olivine-defect chemical model: Insights on electrical conduction, diffusion, and the role of Fe content. Geophys J Int, 1993, 114: 21 ~ 35
- 16 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
- 17 Schock R N, Duba A G, Shankland T J. Electrical conduction in olivine. J Geophys Res, 1989, 94: 5829 ~ 5839
- 18 马晓冰, 孔祥儒, 于晨. 青藏高原西部大地电磁测深探测结果. 科学通报, 1997, 42(11): 1185 ~ 1187
- 19 沈显杰, 张文仁, 杨淑贞, 等. 青藏高原南北地壳幔热结构差异的大地热流证据. 中国地质科学院院报, 1990, 21: 203 ~ 214

(2001-04-06 收稿, 2001-07-06 收修改稿)