

张宝华. 剪切变形下地幔矿物岩石电导率测量的新方法. 地球物理学进展, 2013, 28(5): 2467-2474, doi: 10. 6038/pg20130525.
ZHANG Bao-hua. A new method to measure the electrical conductivity of mantle minerals and rocks under shear deformation. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2013, 28(5): 2467-2474, doi: 10. 6038/pg20130525.

剪切变形下地幔矿物岩石电导率测量的新方法

张宝华^{1,2}

- (1. 冈山大学 地球物质科学研究所, 日本, 三朝 682-0193;
2. 地球内部物质高温高压实验室, 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002)

摘 要 本文中简要介绍了如何利用 DIA 型大压机同时在剪切变形和高温高压下测量地幔矿物岩石电导率的新方法. 首先阐述了 DIA 型大压机的工作原理和剪切变形实验的步骤, 然后选择了两个典型的实例分别从样品合成、实验组装、微组织结构观察等方面简要介绍了剪切变形下电导率测量的流程和最新进展, 最后探讨了新结果在地球物理学方面的一些应用及存在的技术问题. 目前实验研究表明: 含一定量磁铁矿的蛇纹石在剪切变形下不可能在俯冲板块的表面形成相互连接的高导层, 因而磁铁矿假说不能解释俯冲带的高电导率异常; 此外, 发现剪切应力能够诱发熔体在含部分熔融的橄榄岩颗粒边界的重新分布, 从而熔体能够形成相互连接的各向异性网络, 并导致与大地电磁观测结果相一致的高电导率各向异性.

关键词 剪切变形, 电导率, 高温高压, 各向异性, 矿物, 岩石

doi: 10. 6038/pg20130525

中图分类号 P311, P319

文献标识码 A

A new method to measure the electrical conductivity of mantle minerals and rocks under shear deformation

ZHANG Bao-hua^{1,2}

- (1. *Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, Misasa, Tottori-ken 682-0193, Japan;*
2. *Laboratory for High Temperature and High Pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*

Abstract In this paper, a new method was briefly introduced to measure the electrical conductivity of mantle minerals and rocks by using the DIA-type apparatus simultaneously under the shear deformation and high-temperature and high-pressure. Firstly, the principle of the DIA-type apparatus and the experimental procedures of shear deformation were outlined. Secondly, two typical examples were used to display the work flow and recent advances in conductivity measurement under shear deformation in the light of sample synthesis, cell assembly, microstructural observations and so on. Finally, the author discussed the geophysical implications of the present new results and pointed out some technical matters which need more improvements in future. The present experimental results show that the interconnection of magnetite in serpentinites by shear deformation is not expected as an origin of high conductivity anomaly occasionally observed at the slab interface in the mantle wedge. On the other hand, it is found that shear stress can induce the redistribution of melt in partially molten peridotite and form an anisotropically well-interconnected network under shear, which is most likely to explain the high anisotropic conductivity anomalies observed by MT surveys at the top of the asthenosphere.

Keywords shear deformation, electrical conductivity, high temperature and high pressure, anisotropy, minerals, rocks

收稿日期 2012-10-10; 修回日期 2013-03-23. 投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家自然科学基金(41303048)和日本文部省杰出研究中心项目共同资助.

作者简介 张宝华, 男, 1978 生, 博士, 目前在日本文部省做博士后, 主要从事高温高压实验研究.

(E-mail: zhangbh@cc.okayama-u.ac.jp; zhangbh@mail.ustc.edu.cn)

0 引言

电导率是研究地球深部物质组成、状态、性质最重要的物理量之一,它对地球内部的流体和温度变化非常敏感,例如地球深部流体、局部熔融的存在将极大地影响电导率的分布.矿物电导率的测量可以帮助地球物理学家约束电磁观测数据的解释结果,以获取更加可靠的地球内部物质组成、分层结构和物理性质等.同时矿物电导率还可以用来研究矿物的结构、电子和离子的迁移过程、缺陷化学及其它的物理化学性质.因此,矿物电导率对研究地球的起源演化和地球内部的物理学及动力学过程都具有重要的意义.

大多数基于大地电磁(MT)方法建立的电导率模型都显示,在下地壳和软流圈顶部存在高导异常^[1-5].特别是 Evans *et al.*^[3] 不仅在东太平洋中脊的南部 100 公里深处观察到了高导异常(10^{-1} S/m),而且发现平行于板块运动方向的电导率比垂直于板块运动方向的电导率高一个数量级.长期以来,下地壳和上地幔高电导率异常的起因一直困惑不解也引起了地球物理学家的极大兴趣,部分熔融^[6-10]、水^[11-18]、流体^[19,20]、碳^[21-23]或是其他异常体^[24,25]等常被用来解释这些观察到的高电导率异常.

传统意义上的电导率实验,无论用什么设备(活塞圆筒,大压机, DAC 和 Paterson 型流变仪等)在任何条件下(含水的、不含水的)都是在没有剪切变形下测量的,读者可参考 Yoshino^[26] 的回顾文章.尽管 Caricchi *et al.*^[27] 在高温高压下用 Paterson 型流变仪发现了部分熔融橄榄岩具有电导率各向异性,不过他们并没有同时测量平行和垂直于剪切方向的电导率.因此,截至目前还从来没有一个实验测量能够证实 Evans *et al.*^[3] 的各向异性观测.本文中主要介绍如何利用 DIA 型大压机同时在剪切变形和高温高压下测量地幔矿物岩石的电导率.

1 实验设备及原理

在测量地幔矿物岩石电导率的过程中,不但需要测量电导率的实验技术,还需要产生高温高压的实验设备.本研究中所用到的高压设备(如图 1)是安装在日本冈山大学地球物质科学研究所(ISEI, Okayama University)的 DIA 型大腔体压力机(UPH-2000).图 2 为 UPH-2000 吨压力机的紧装式四滑座六面顶超高压装置结构原理图^[28,29].六面顶超高压装置分别固定在上下两个模框中,上下模

框中心各固定一个碳化钨顶砧;下模框导向槽上放置四个滑块,滑块上装有碳化钨顶砧.当下模框被活塞推动向上时,上下模框中心的顶砧和下模框导向槽中 4 个滑块上的顶砧同时挤压六面体传压介质,从而使传压介质中心孔中的腔体产生静态超高压.通过更换不同砧面面积(15×15 , 19×19 , 27×27)的碳化钨顶砧,最高可获得超过 8 GPa 的压力. UPH-2000 吨压力机有三套独立的控制系统:油压控制系统,加热系统和变形-微变位控制测量系统.这里主要介绍变形-微变位控制测量系统,该系统在下模框的中心可以放置碳化钨小活塞,相应的顶砧也要更换成中心带孔的顶砧(如图 2 所示).试样的应变率通过大压机下方的伺服马达带动楔状齿轮向前移动来推动碳化钨小活塞向上运动来控制,其中小活塞的最大移动距离为 2 毫米.

2 剪切变形下进行原位高温高压电导率测量的最新进展

通常变形实验的步骤:

- 1) 首先通过多次试验找到最合适的样品组装;
- 2) 将压力升到预期值,然后再缓慢升温到理想值;
- 3) 在变形-微变位控制测量系统中找到碳化钨小活塞的零点,并确认在这点样品有没有变形产生,如果有变形则继续调整组装直到样品没有变形为止;
- 4) 在恒定温压下变形实验开始,样品的应变率通过改变碳化钨小活塞移动速率来控制.特别值得注意的是在剪切变形下测量电导率,在电导率实验之前应先校正剪切应变大小^[30],这一步可在找到零点之后完成;
- 5) 电导率(复阻抗谱)测量,实际上当温度压力达到预期值以后就已经开始测量了.

下面将提供一些利用 DIA 型大压机同时在剪切变形和高温高压下进行原位电导率测量的最新进展的实例.

2.1 简单体系的剪切变形

蛇纹石是俯冲带最主要的含水矿物之一,它是由于俯冲板块在下沉过程中地幔橄榄岩与矿物脱水释放出来的含水流体发生交代作用的主要产物,另外还有少量磁铁矿^[31].因此蛇纹石也常被用来解释俯冲带局部存在的波速、电导率、温度、地震分布等方面的异常^[4,32-35].特别值得注意的是最新的网络大地电磁方法(NMT)研究^[32]显示,在日本西南 Kii

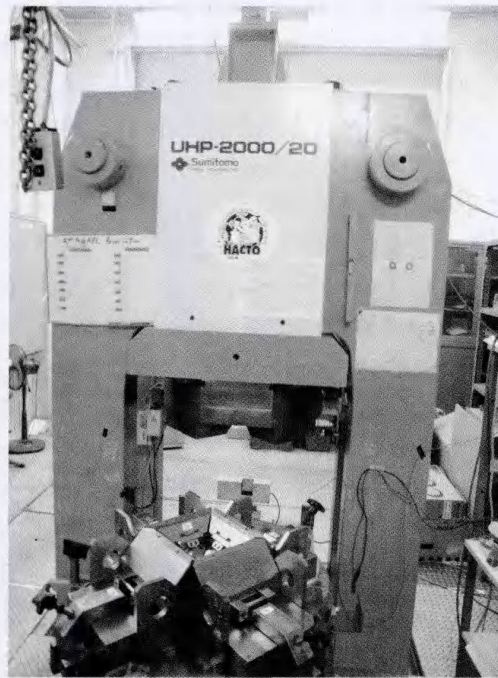


图1 DIA型(UPH-2000)多面顶砧压机示意图

Fig. 1 Photo of the DIA-type (UPH-2000) apparatus

半岛下方 20-60 公里左右存在高导异常区 ($10^{-0.5}$ S/m). 通常纯蛇纹石^[36,37]的电导率是比较低的($< 10^{-2}$ S/m, 与含水橄榄石相当), 因此矿物

含水说无法解释这一新的观测. 此外, 蛇纹岩的剪切变形实验表明在剪切应力作用下蛇纹石的晶格优选方向会发生旋转^[38]. 正是基于这一发现, 提出如下假设: 因为磁铁矿的电导率比纯蛇纹石要高几个数量级, 如果将一定比例的磁铁矿混合到蛇纹石中, 在剪切变形下由于蛇纹石晶格优选方向的转变就有可能导致磁铁矿在俯冲板块的表面相互连接形成高导层, 从而解释 NMT 观测到的高导异常. 为了验证这一假设是否正确, Kawano^[39]等人从事了下面的实验研究工作.

实验的开始材料为天然叶蛇纹石和多晶磁铁矿, 将磁铁矿按一定体积比(5, 10, 20, 25, 30 vol%) 均匀混合, 在 1 GPa 和 500 °C 用活塞圆筒烧结合成. 烧结后的样品如图 3(a) 所示, 磁铁矿在蛇纹石中呈相互隔绝的均匀分布. 图 4 为测量含一定磁铁矿的蛇纹石电导率的样品组装示意图, 压力介质为叶腊石, 活塞材料为氧化铝, 金属镍做电极. 由于蛇纹石只在剪切应力方向发生晶格优选方向的重新排列, 所以只在图 4 中测量剪切方向的电导率.

实验结果表明(见图 5a): 随着磁铁矿比例的增加, 蛇纹石的电导率也呈量级的增加; 当磁铁矿比例小等于 25 vol% 时, 随着剪切应变的增加, 含磁铁矿的蛇纹石电导率也增加; 但当磁铁矿比例超过 25 vol% 时, 电导率基本不再随剪切应变的增加而变

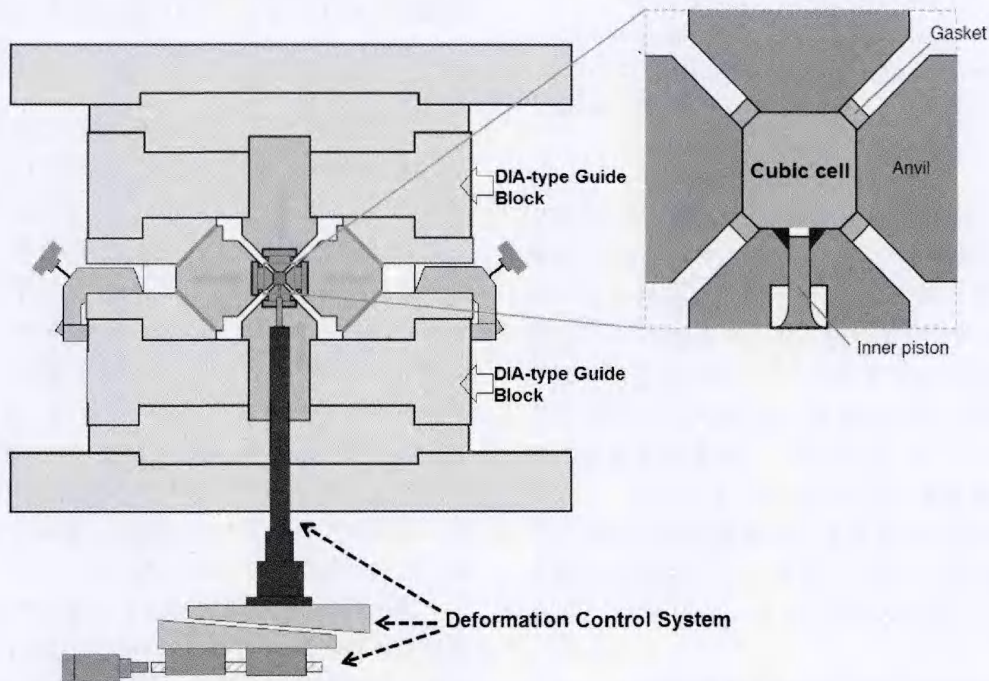


图2 DIA型(UPH-2000)多面顶砧压机结构原理图

Fig. 2 Schematic drawing of the DIA-type (UPH-2000) apparatus

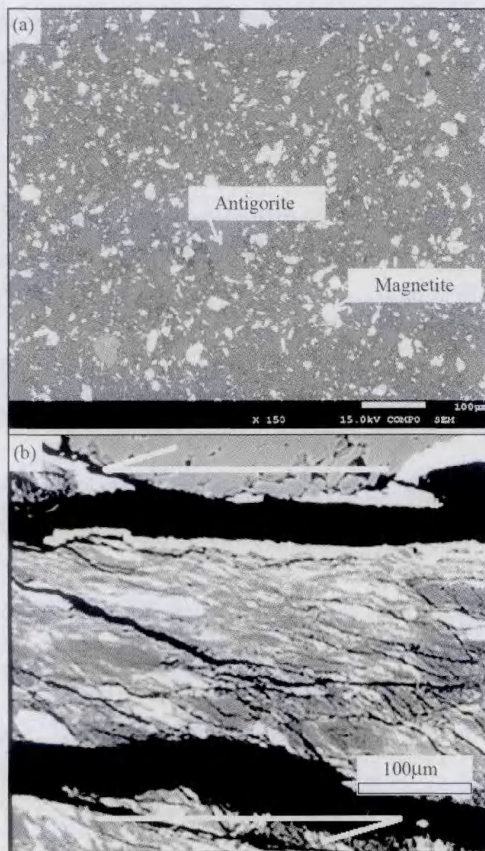


图3 (a)变形实验前人工合成含磁铁矿 20wt%的蛇纹石;
(b) 变形实验后的蛇纹石(修改自[34]).

Fig. 3 (a)SEM image of synthesized serpentinite with 20 wt% magnetite before shear deformation; (b) SEM image of synthesized serpentinite after shear deformation (modified after Kawano *et al.* [39]).

化.在图5中,尽管在剪切变形下含 20 vol%磁铁矿的蛇纹石电导率与 MT 方法观测到的高导异常值^[4,32]非常一致,但是变形实验之后的样品微组织结构观察(图 3b)显示磁铁矿在蛇纹石中并没有受剪切应力影响而相互连接.另外,如果目前的实验测量能够解释大地电磁观测的结果,那么蛇纹石至少需要含有 20 vol%的磁铁矿,但是目前发现的天然蛇纹岩中磁铁矿的体积分数都小于 5 vol%^[31,38].因此,目前的磁铁矿假说不可能解释俯冲带的高电导率异常,取而代之的可能是在这一区域存在地幔流体^[32,36,40],其体积分数大约 0.5~10 vol%(见图 5b).

2.2 部分熔融橄榄岩的电导率各向异性

如前所述,矿物岩石在含水^[11-18]、含流体^[19,20]或是含部分熔融^[6-10]的条件下都显示出了与地球物

理场观测结果量级相当的高电导率,但是这些已知的实验结果都是在非剪切变形下测量得到的,并且都无法解释东太平洋中脊附近区域观测到的电导率各向异性^[3].此外,含玄武岩部分熔融的橄榄石变形实验^[30,41]结果显示:在高温高压下,由于剪切应力的作用熔体在橄榄石颗粒边界会发生重新分布,并形成富集熔体的条带,这种条带会在整个空间相互连接进而形成熔体的立体网络.正是基于这些变形实验结果,我们设想含部分熔融的橄榄岩在剪切变形条件下如果熔体能够形成相互连接各向异性网络,那么就可能观测到电导率各向异性,进而解释 MT 的观测结果.

图 6 为测量部分熔融橄榄岩电导率各向异性的样品组装示意图,压力介质为叶腊石,活塞材料为镁橄榄石单晶.实验样品所用的开始材料为人工合成的玄武岩(化学成分: SiO₂ 48.67wt%, MgO 23.25 wt%, Al₂O₃ 15.96 wt%, CaO 10.44 wt%, Na₂O 0.86 wt%, K₂O 0.16 wt%)和橄榄石(化学成分: SiO₂ 43.46wt%, MgO 56.77 wt%, Al₂O₃ 0.07 wt%, CaO 0.06 wt%).将玄武岩和镁橄榄石按体积分数 98.5:1.5 的比例均匀混合,部分熔融橄榄岩样品通过 KAWAI 型大压机在 1 GPa,1523 K 下合成,其微组织结构如图 7(a)所示,在变形实验之前,玄武岩熔体在镁橄榄石颗粒边界基本呈相互隔绝的均匀分布.然后用超声波将样品切成圆柱状,进一步再按 45 度角切成厚度 0.3~0.5 mm 的薄片放入图 6 所示样品腔.

将压力升到预期值(1 GPa),然后缓慢升温到 1523 K;找到 WC 活塞的零点后,变形和电导率(复阻抗谱)测量就已经同时开始了.注意在组装图 6 中一共引出 2 对电极线,分别用来测量平行于剪切变形方向和垂直于剪切变形方向.电导率实验结果如图 8(a)所示,随着时间增长,样品的剪切应变(γ)逐渐变大,发现平行于剪切变形方向的电导率急剧增加而垂直于剪切变形方向的电导率几乎不变,最后这两个方向的电导率差别大于 1 个数量级.这种各向异性的电导率必定是由于在剪切应力作用下玄武岩熔体发生各向异性分布所致,实际上电导率实验之后的样品微组织结构观察(图 7(b))进一步证实了上面的假设.尽管剪切变形下测量部分熔融样品电导率还存在诸多问题,目前获得的各向异性电导率初步实验结果很好地解释了 Evans *et al.*^[3]等人的地球物理场观测结果(见图 8b).并据此进一步推测,在软流圈顶部熔体分数可能为 1~2 vol%.

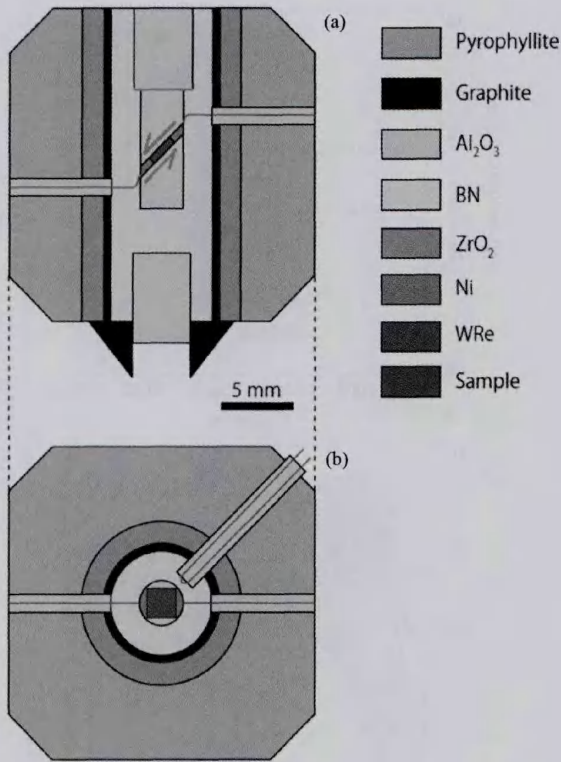


图 4 简单变形下实验样品组装示意图[39]

(a)剖面图; (b)俯视图。

Fig. 4 Sample assembly for conductivity measurement under simple shear [39]

(a)Cross section of assembly; (b) Overhead view of assembly.

3 结 语

利用 DIA 型大压机同时在剪切变形和高温高压下测量地幔矿物岩石的电导率具有相当大的技术难度,目前这方面的工作还处于探索阶段,还有许多的技术难题需要解决:

1)与一般的剪切实验相比,电导率测量需要样品周围的材料具有很好的导热性和绝缘性,同时在样品含流体或存在熔融的情况下,样品还不能与其他材料发生反应.特别是 piston 材料的选择至关重要,不仅需要有良好的导热性和绝缘性(因此不可能选择金属或合金做 piston 材料,比如 WC)还必须具有相当大的硬度和强度.通常用氧化铝(Al_2O_3)作 piston,但是氧化铝在高温高压下很容易与氧化镁(MgO)反应生成尖晶石.尽管金刚石是很好的 piston 材料,但由于其造价高昂而显得不切实际.其他的 piston 材料如橄榄石单晶,forsterite 单晶,氧化镁单晶等等.

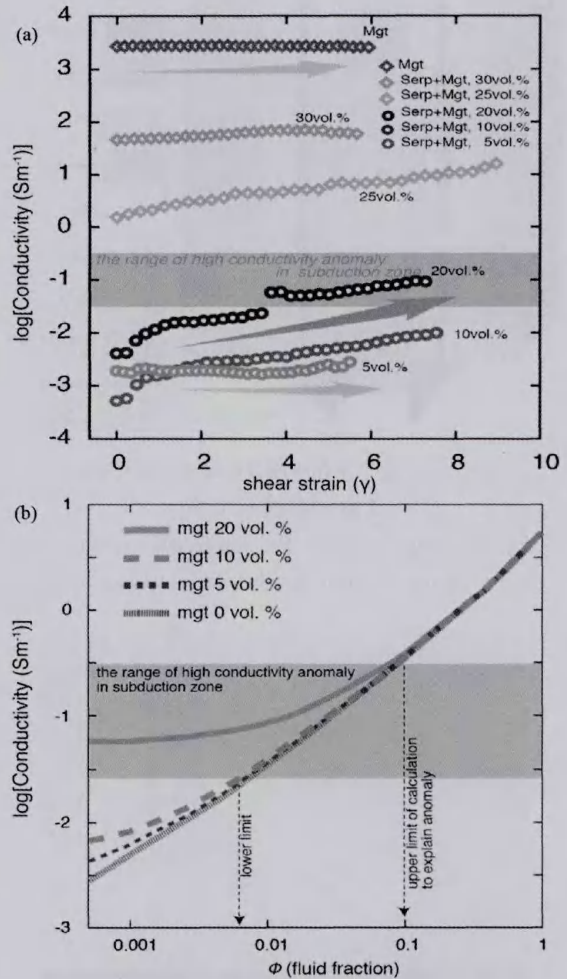


图 5 含磁铁矿的蛇纹石在剪切变形下的电导率

(a)随剪切应变大小变化的函数关系(据 Kawano 等[39]);

(b) 1 GPa 和 750 K 下随流体分数变化的模型(据 Kawano 等[39]).

Fig. 5 Electrical conductivity of magnetite-bearing serpentine under shear deformation;

(a) as a function of shear strain (modified after Kawano

et al. [39]); (b) electrical conductivity models of fluid-bearing

serpentes with various fluid fraction at 1 GPa and 750 K

(modified after Kawano *et al.* [39]).

2)电导率实验需要大体积(直径 >2 毫米,长度 >3 毫米)且没有孔隙裂纹的样品,由于合成部分熔融样品需要淬火所以在高压下很难做到这一点.目前,笔者正在从事这方面的实验研究工作,如果以上问题在不久的将来能够得到很好解决,相信还有很多新的发现.这些新成果会对我们进一步探讨地幔高导层成因、板块俯冲、地幔中熔体的含量与分布、地球演化等重要科学问题提供最直接的实验证据.

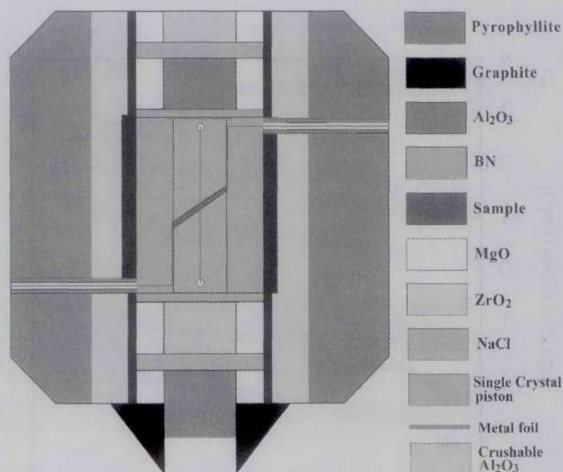


图 6 剪切变形下用于测量电导率各向异性的实验样品组装示意图

Fig. 6 Sample assembly for anisotropic conductivity measurement under shear deformation

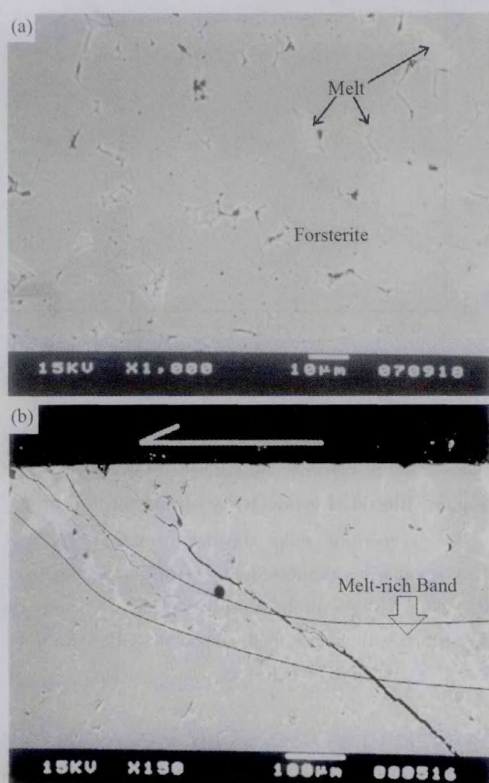


图 7 (a) 变形实验前人工合成含部分熔融的橄榄岩; (b) 变形实验后的橄榄岩(形成了富集熔体的带状) (修改自 Manthilake[42]和 Zhang 等[43]).

Fig. 7 (a) SEM image of partially molten peridotite before shear deformation; (b) SEM image of partially molten peridotite after shear deformation (modified after Manthilake[42] and Zhang *et al.* [43])

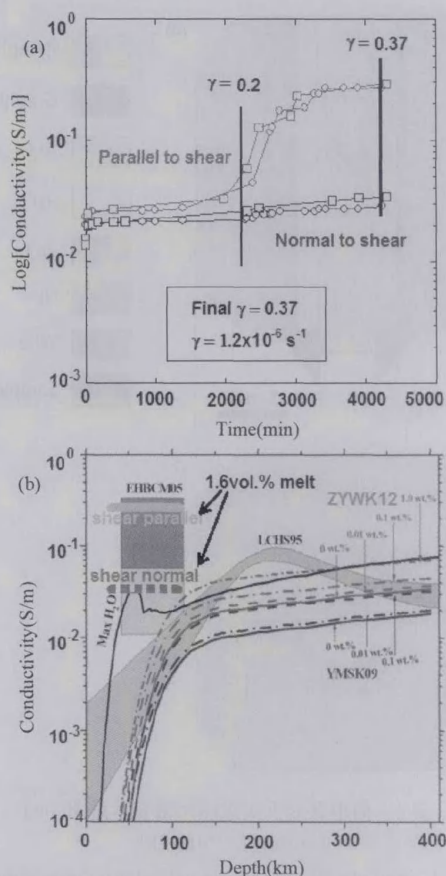


图 8 (a)部分熔融的橄榄岩在剪切变形下电导率随时间变化的函数关系(修改自 Manthilake[42]); (b)上地幔电导率模型(修改自 Zhang 等[17],其中模型来自 ZYWK12[17], YMSK09[15], LCHS95[1], EHBCM05[3]).

Fig. 8 (a)Electrical conductivity of partially molten peridotite as a function of time under shear deformation (modified after Manthilake[42]); (b)Electrical conductivity models in the upper mantle (modified after Zhang *et al.* [17], the models referred to ZYWK12[17], YMSK09[15], LCHS95[1], EHBCM05[3])

参 考 文 献 (References):

[1] Lizarralde D, Chave A D, Hirth G, *et al.* Northeastern Pacific mantle conductivity profile from long-period magnetotelluric sounding using Hawaii - to-California submarine cable data [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(B9): 17837-17854.

[2] Wei W B, Unsworth M J, Jones A G, *et al.* Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 716-718.

[3] Evans R L, Hirth G, Baba K, *et al.* Geophysical evidence from the MELT area for compositional controls on oceanic plates[J]. *Nature*, 2005, 437(7056): 249-252.

- [4] Ichiki M, Baba K, Toh H, *et al.* An overview of electrical conductivity structures of the crust and upper mantle beneath the northwestern Pacific, the Japanese Islands, and continental East Asia[J]. *Gondwana Research*, 2009, 16(3-4): 545-562.
- [5] Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, *et al.* Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. *Nat. Geosci.*, 2010, 3(5): 358-362.
- [6] Presnall D C, Simmons C L, Porath H. Changes in electrical conductivity of a synthetic basalt during melting [J]. *J. Geophys. Res.*, 1972, 77(29): 5665-5672.
- [7] Tyburczy J A, Waff H S. Electrical conductivity of molten basalt and andesite to 25 kilobars pressure: geophysical significance and implications for charge transport and melt structure[J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88(B3): 2413-2430.
- [8] Gaillard F, Marki M, Iacono-Marziano G, *et al.* Carbonatite melts and electrical conductivity in the asthenosphere [J]. *Science*, 2008, 322(5906): 1363-1365.
- [9] Yoshino T, McIsaac E, Laumonier M, *et al.* Electrical conductivity of partial molten carbonate peridotite[J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2012, 194-195: 1-9.
- [10] 黄小刚, 黄晓葛, 白武明. 高温高压下矿物岩石电导率的实验研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(4): 1247-1258. Huang X G, Huang X G, Bai W M. Progress of high temperature and high pressure experimental study on the electrical conductivity of the minerals and rocks[J]. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2010, 25(4): 1247-1258.
- [11] Karato S. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle[J]. *Nature*, 1990, 347(6290): 272-273.
- [12] Huang X G, Xu Y S, Karato S I. Water content in the transition zone from electrical conductivity of wadsleyite and ringwoodite[J]. *Nature*, 2005, 434(7034): 746-749.
- [13] Wang D J, Mookherjee M, Xu Y S, *et al.* The effect of water on the electrical conductivity of olivine[J]. *Nature*, 2006, 443(7114): 977-980.
- [14] Yoshino T, Matsuzaki T, Yamashita S, *et al.* Hydrous olivine unable to account for conductivity anomaly at the top of the asthenosphere[J]. *Nature*, 2006, 443(5223): 973-976.
- [15] Yoshino T, Matsuzaki T, Shatskiy A, *et al.* The effect of water on the electrical conductivity of olivine aggregates and its implications for the electrical structure of the upper mantle [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009, 288(1-2): 291-300.
- [16] Dai L D, Karato S. Electrical conductivity of orthopyroxene: Implications for the water content of the asthenosphere[J]. *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, 2009, 85(10): 466-475.
- [17] Zhang B H, Yoshino T, Wu X P, *et al.* Electrical conductivity of enstatite as a function of water content: Implications for the electrical structure in the upper mantle[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2012, 357-358: 11-20.
- [18] 张宝华, 吴小平, 许俊飞, 等. 1600K 和 20GPa 温压条件下的顽火辉石电导率[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(3): 760-764.
- Zhang B H, Wu X P, Xu J S, *et al.* Electrical conductivity of enstatite up to 20 GPa and 1600K[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(3): 760-764.
- [19] Marquis G, Hyndman R D. Geophysical support for aqueous fluids in the deep crust: seismic and electrical relationships [J]. *Geophys. J. Int.*, 1992, 110(1): 91-105.
- [20] Shimozuku A, Yoshino T, Yamazaki D, *et al.* Electrical conductivity of fluid-bearing quartzite under lower crustal conditions[J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2012, 198-199: 1-8.
- [21] Mareschal M, Fyfe W S, Percival J, *et al.* Grain-boundary graphite in Kapuskasing gneisses and implications for lower-crustal conductivity[J]. *Nature*, 1992, 357(6380): 674-676.
- [22] Glover P W J. Graphite and electrical conductivity in the lower continental crust: a review[J]. *Phys. Chem. Earth*, 1996, 21(4): 279-287.
- [23] Yoshino T, Noritake F. Unstable graphite films on grain boundaries in crustal rocks[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2011, 306(3-4): 186-192.
- [24] 李朋, 周文戈, 龚超颖, 等. 高压下华北北缘二辉麻粒岩电导率的研究[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(10): 2386-2395. Li P, Zhou W G, Gong C Y, *et al.* Electrical conductivity of two-pyroxene granulite under high pressure in northern margin of North China craton[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(10): 2386-2395.
- [25] 郭颖星, 王多君, 李和平, 等. 高温高压下麻粒岩电导率研究[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(11): 2681-2687. Guo Y X, Wang D J, Li H P, *et al.* The electrical conductivity of granulite at high temperature and high pressure[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(11): 2681-2687.
- [26] Yoshino T. Laboratory electrical conductivity measurement of mantle minerals[J]. *Surv. Geophys.*, 2010, 31(2): 163-206.
- [27] Caricchi L, Gaillard F, Mecklenburgh J, Le Trong E. Experimental determination of electrical conductivity during deformation of melt-bearing olivine aggregates: Implications for electrical anisotropy in the oceanic low velocity zone[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2011, 302(1-2): 81-94.
- [28] 谢鸿森. 地球深部物质科学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- Xie H S. Introduction to the materials science of the Earth's interior (in Chinese)[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [29] 王雁宾. 地球内部物质物性的原位高温高压研究——大体积压机与同步辐射源的结合[J]. *地学前缘*, 2006, 13(2): 1-36.
- Wang Y. Combining the large-volume press with synchrotron radiation: applications to in-situ studies of Earth materials under high pressure and temperature [J]. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2006, 13(2): 1-36.
- [30] Holtzman B K, Groebner N J, Zimmerman M E, *et al.* Deformation-driven melt segregation in partially molten rocks

- [J]. *Geochem. Geophys., Geosys.*, 2003, 4(5): 8607.
- [31] Evans B W. Lizardite versus antigorite serpentinite; Magnetite, hydrogen, and life? [J]. *Geology*, 2010, 38(10): 879-882.
- [32] Yamauchi M, Uyeshima M, Murakami H, *et al.* Modification of the Network-MT method and its first application in imaging the deep conductivity structure beneath the Kii Peninsula, southwestern Japan[J]. *Earth Planets Space*, 2009, 61(8): 957-971.
- [33] 余日东, 金振民. 蛇纹石脱水与大洋俯冲带中源地震(70~300 km)的关系[J]. *地学前缘*, 2006, 13(2): 191-204.
Yu R D, Jin Z M. Relationship between dehydration of serpentine and intermediate-focus earthquakes in oceanic subduction zones[J]. *Earth Science Frontiers (in Chinese)*, 2006, 13(2): 191-204.
- [34] 谢鸿森, 周文戈, 李玉文, 等. 高温高压下蛇纹岩脱水的弹性特征及其意义[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(6): 811-816.
Xie H S, Zhou W G, Li Y W, *et al.* The elastic characteristics of serpentinite dehydration at high temperature-high pressure and its significance[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2000, 43(6): 811-816.
- [35] 金振民, 章军锋, Green H W 等. 大洋深俯冲带流变性质及其地球动力学意义——来自地幔岩高温高压实验的启示[J]. *中国科学 D*, 2001, 31(12): 969-976.
Jin Z M, Zhang J F, Green H W, *et al.* Rheological properties of deep subducted oceanic lithosphere and their geodynamic implications[J]. *Sci. China D*, 2001, 45(11): 969-977.
- [36] Reynard B, Mibe K, Van de Moortèle B. Electrical conductivity of the serpentinised mantle and fluid flow in subduction zones [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2011, 307(3-4): 387-394.
- [37] Guo X, Yoshino T, Katayama I. Electrical conductivity anisotropy of deformed talc rocks and serpentinites at 3 GPa[J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2011, 188(1-2): 69-81.
- [38] Katayama I, Hirauchi K, Michibayashi K, *et al.* Trench-parallel anisotropy produced by serpentine deformation in the hydrated mantle wedge[J]. *Nature*, 2009, 461(7267): 1114-1117.
- [39] Kawano S, Yoshino T, Katayama I. Electrical conductivity of magnetite-bearing serpentinite during shear deformation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2012, 39(20): L20313.
- [40] Peacock S M, Wang K L. Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: Examples from Southwest and Northeast Japan [J]. *Science*, 1999, 286(5441): 937-939.
- [41] Kohlstedt D L. Partial melting and deformation[J]. *Rev. Mineral. & Geochem.*, 2002, 51(1): 121-135.
- [42] Manthilake M A G M. Laboratory measurements of electrical conductivity and their application to composition and dynamics of the mantle[D]. Okayama: Okayama University, 2009.
- [43] Zhang B H, Yoshino T, Yamazaki D, *et al.* Electrical conductivity anisotropy in partially molten peridotite under shear deformation[J]. To be submitted.