

高压物理学报

高温高压下花岗岩部分熔融时的电导率

王双杰 易丽 王多君 申珂玮 韩珂楠

Experimental Conductivity of Partial Melt Granite at High Temperature and Pressure

WANG Shuangjie, YI Li, WANG DuoJun, SHEN Kewei, HAN Kenan

引用本文:

王双杰, 易丽, 王多君, 等. 高温高压下花岗岩部分熔融时的电导率[J]. 高压物理学报, 2020, 34(5):051201. DOI: 10.11858/gywlb.20200502

WANG Shuangjie, YI Li, WANG DuoJun, et al. Experimental Conductivity of Partial Melt Granite at High Temperature and Pressure[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(5):051201. DOI: 10.11858/gywlb.20200502

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200502>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压下单晶橄榄石的电导率

High-Pressure Electrical Conductivity of Single-Crystal Olivine

高压物理学报. 2019, 33(6): 060103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190775>

压力对纯的和含硫化亚铁的橄榄石电导率影响的实验研究

Experimental Study on the Effect of Pressure on the Electrical Conductivity of Pure and Iron Sulfide-Bearing Olivine

高压物理学报. 2019, 33(5): 051201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180674>

高压对钴酸锂的晶体结构和离子导电率的影响

High Pressure Effect on the Structure and Ionic Conductivity in Layered Cobaltite LiCoO_2

高压物理学报. 2017, 31(5): 529 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.05.004>

复杂材料高压性质的计算与模拟: 基于第一性原理方法的部分进展

Computation and Simulation of High-Pressure Properties of Complex Materials: A Brief Review on the Methods Based on First-Principles

高压物理学报. 2019, 33(3): 030102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190710>

$\text{Re-H}_2\text{O}$ 体系高温高压化学反应的拉曼证据

Raman Evidences of Chemical Reaction of $\text{Re-H}_2\text{O}$ System at High Pressure and High Temperature

高压物理学报. 2020, 34(4): 040102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200518>

NaCl-O_2 体系高温高压化学反应的拉曼光谱证据

Raman Evidences of Chemical Reaction of NaCl-O_2 System at High Pressure and High Temperature

高压物理学报. 2017, 31(6): 692 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.06.003>

高温高压下花岗岩部分熔融时的电导率

王双杰¹, 易 丽¹, 王多君², 申珂玮², 韩珂楠¹

(1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049)

摘要: 大地电磁测深结果显示青藏高原中上地壳存在高导层, 而花岗岩是地壳岩石的主要组成部分, 在地壳演化过程中发挥着重要作用。在高温高压下开展花岗岩部分熔融时电导率实验对认识青藏高原地壳电性结构及地壳演化过程具有重要意义。在 0.5~2.0 GPa 压力、773~1 373 K 温度条件下测量花岗岩的电导率。实验结果表明: 在温度为 773~1 223 K 时, 样品的活化焓为 1.01~1.09 eV; 在温度为 1 223~1 373 K 时, 样品的活化焓为 2.16~2.97 eV。不同温度段内活化焓的变化可能与花岗岩样品中黑云母的脱水熔融有关, 推断花岗岩部分熔融时导电机制为离子导电, Na^+ 起主导作用。将实验测得的电导率与西藏高导层地壳温度背景结合发现: 在 973~1 223 K 范围内实验电导率值在 0.016~0.310 S/m 范围内, 与大地电磁测深数据吻合较好, 表明西藏地壳高导层的成因与花岗岩部分熔融关系较为密切。

关键词: 高温高压; 电导率; 花岗岩; 部分熔融

中图分类号: O732; P574.1

文献标识码: A

电导率对矿物和岩石成分的变化以及体系内熔体/流体的存在和分布非常敏感, 因此高温高压原位测量矿物岩石电导率实验可以用来探究地球内部的物质组成、热结构、水分布及部分熔融等信息^[1-3]。通过大地电磁测深技术在青藏高原南部地壳发现了很多高导层^[4-6], 高温高压下地壳岩石电导率实验对合理解释这些电磁探测数据具有重要意义。

目前, 青藏高原地壳中产生高电导率异常的原因尚不清楚, 引起了很多研究者的兴趣。部分学者认为花岗岩发生部分熔融是电导率异常的重要原因^[7-9], 因此对花岗岩电导率的研究也受到了重视。Olhoeft^[10] 的早期研究认为花岗岩的导电性主要由花岗岩中自由水含量和温度控制, 受静水压、结构束缚水、氧逸度及其他参数影响较小; Shanov 等^[11] 研究了保加利亚南部地区花岗岩的电导率, 认为花岗岩电导率的最大值在 1 023~1 093 K 温度范围内, 这与 β -石英向 β -磷灰石转化有关; 柳江琳等^[12] 在 1.0 GPa、563~1 133 K 条件下研究了花岗岩的电导率, 发现花岗岩在该温度范围内变化了约 4 个数量级; 郭颖星等^[13] 发现黑云母和白云母脱水导致花岗岩的电导率升高; Guo 等^[14] 和 Chen 等^[15] 研究了不同含水量熔体的电导率, 发现含水情况下花岗岩熔体的电导率可以达到 1 S/m。目前, 不同实验室测得的花岗岩电导率结果存在一定差异, 因此有必要进一步开展更多花岗岩电导率工作, 规范、精确数据。考虑到天然样品的复杂性, 本研究以淡色花岗岩为研究对象, 在高温高压条件下对粒度均匀的不同矿物进行热压成岩, 然后在不同压强条件下测量花岗岩的电导率, 通过实验结果解释藏南地区的电磁异常效应。

* 收稿日期: 2020-01-06; 修回日期: 2020-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(41373060); 中央高校基本科研业务费专项资金(Y954012)

作者简介: 王双杰(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事矿物电学性质研究. E-mail: 1193938748@qq.com

通信作者: 王多君(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事矿物物理、地球内部物理研究.

E-mail: duojunwang@ucas.edu.cn

1 实验方法

1.1 样品准备

实验样品采自西藏地区的黑云母花岗岩, 样品表面新鲜, 结构紧密, 呈黑白色, 主要由 50% 长石、40% 石英和 10% 黑云母构成, 样品的组成成分如表 1 所示。

表 1 花岗岩样品的矿物成分及含量
Table 1 Compositions of the minerals in granite

Compounds	Content/%			
	Quartz	K-feldspar	Albite	Biotite
Na ₂ O	0.008	0.774	10.887	0.319
MgO	0.002	0	0	2.694
Al ₂ O ₃	0.113	18.771	22.019	20.368
SiO ₂	97.196	67.117	65.805	40.506
SrO	0.288	0.639	0.240	0
K ₂ O	0.026	15.175	0.144	8.342
CaO	0.016	0.003	1.550	0.084
MnO	0.023	0.072	0	0.470
FeO	0.087	0.096	0.016	24.901
TiO ₂	0.069	0.103	0	2.147
Total	97.828	102.750	100.661	99.831

实验前将新鲜岩石样品在石英研钵中磨成粒径小于 100 μm 的粉末, 然后在压强为 1.0 GPa、温度为 773 K 的条件下进行 3 h 热压合成粉末, 制成 $\varnothing 8\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的标准圆柱体。

1.2 实验过程

高压样品的电阻抗测量组装如图 1 所示。为了避免实验过程中叶蜡石传压介质脱水对测量结果的影响, 样品组装前将立方体叶蜡石块 (32.5 mm $\times$ 32.5 mm $\times$ 32.5 mm) 和叶蜡石堵头在 1 073 K 下煅烧 10 h。绝缘管为氧化铝管, 实验前也将其在 1 073 K 高温下煅烧除去吸附水, 将 Al₂O₃ 绝缘管置于加热器中部以减少温度梯度的影响。使用金属 Mo 作为测量电极, 并控制样品腔内的氧逸度。加热器由双层不锈钢片制成, 样品腔内温度通过 NiGr-NiAl 热电偶测量, 热电偶紧靠花岗岩样品, 温度的测量误差为 $\pm 10\text{ K}$ 。

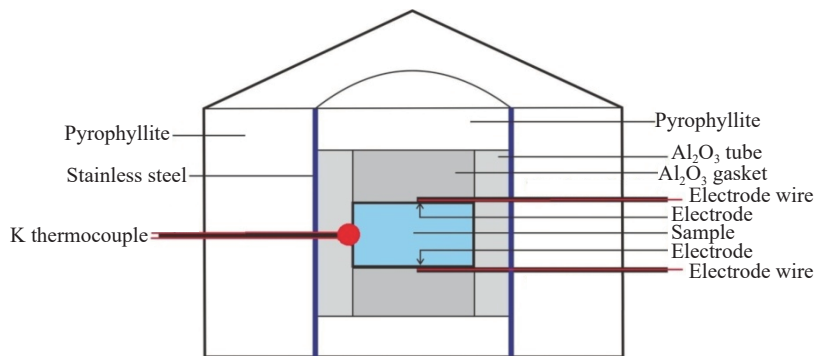


图 1 样品高压电导率测量组装示意图

Fig. 1 Sample assembly for high pressure conductivity measurement

高温高压实验在中国科学院大学地球与行星科学学院六面顶压机上完成, 实验时先将压强升到预定值, 然后加热升温, 在测量开始前先恒压 12 h, 温度维持在 1 223 K, 使样品内部处于部分熔融状态。测量过程中每个温度点间隔 50 K, 电阻测量装置为 Solartron1260 阻抗/增益相位分析仪, 采用多轮升降温循环测量, 测量各温度点在每个频率下的模值 $|Z|$ 和相角 θ , 测量频率范围为 $1 \sim 10^6$ Hz, 电压 0.1 V, 有关交流阻抗谱法的相关原理参考文献 [16]。

2 实验结果与分析

在压强为 0.5~2.0 GPa、温度为 773~1 373 K 的条件下, 通过实验获得了花岗岩样品复阻抗的波特 (Bode) 图。图 2 分别给出了不同温度下样品的相角 θ 和模值 $|Z|$ 随频率的变化。由复阻抗模与频率的关系曲线(图 2(b))可以看出, 模值 $|Z|$ 对频率 f 有很强的依赖性, 在高频阶段($10^3 \sim 10^6$ Hz)随着频率降低 $|Z|$ 值迅速增大, 当频率达到 10^3 Hz 左右时 $|Z|$ 基本趋于稳定, 并且随着温度降低这种趋势逐渐向低频段过渡。从图 2(a)可知: 相角同样对频率有较强的依赖性, 即随着扫描频率降低, 相角由高频近 0° 逐渐增大, 当频率高于 10^6 Hz 时相角趋于 90° , 并且随着温度降低, 这种趋势向低频段过渡, 在相同频率下温度越高, 相角的值越小, 表明花岗岩的导电性对频率也具有依赖性。

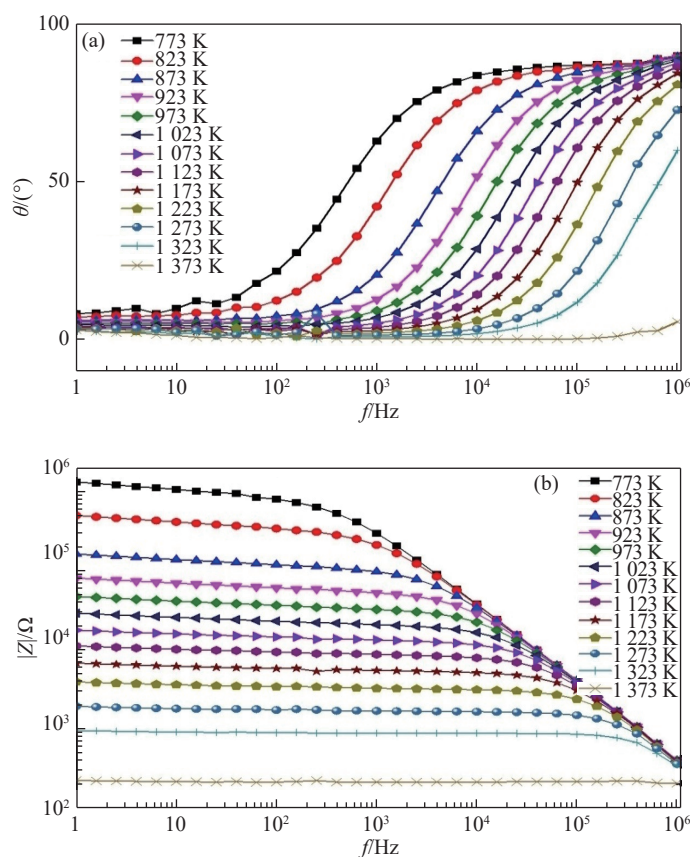


图 2 压强 1.0 GPa、温度 773~1 373 K 条件下花岗岩样品相角和模随频率的变化

Fig. 2 Respectively changes of phase angle and modulus of impedance as the function of frequency for granite at 1.0 GPa and 773–1 373 K

图 3 给出了 1.0 GPa、773~1 373 K 条件下, 在 $1 \sim 10^6$ Hz 频率范围内, 实验得到的花岗岩样品复阻抗谱 Nyquist 图, 横坐标 Z' 为阻抗的实部, 纵坐标 Z'' 为阻抗的虚部, 单位为 $k\Omega$ 。从图 3 可以看出 4 个温度段内阻抗的实部 Z' 和虚部 Z'' 随频率的变化规律: 在低温 773~873 K 时, 复阻抗谱主要体现了高频段样品颗粒内部的信息, 相对低频段颗粒边界的信息较少, 如图 3(a) 所示; 在 923~1 023 K 和 1 073~

1 173 K 温度区间内, 阻抗谱体现了样品颗粒内部和颗粒边界较完整的信息, 高频段均出现了过原点的半圆弧, 而低频段出现了一条长尾, 如图 3(b) 和图 3(c) 所示; 图 3(d) 中可以看到, 在高温区间 1 223~1 373 K 时, 高频段的阻抗弧没有过原点, 与图 3(b) 和图 3(c) 相比, 颗粒边界信息较少。在 0.5 GPa 和 2.0 GPa 条件下复阻抗谱表现出相似的变化规律。复阻抗图中的半圆弧代表样品颗粒内部的传导机制, 其直径对应样品的电阻, 小尾巴代表颗粒边界的传导机制^[17-18]。随着温度升高, 半圆弧的直径迅速减小, 即电阻迅速降低、电导率增大, 表明样品的电阻对温度有很强的依赖性, 在温度由低到高过程中样品呈现出半导体性质。

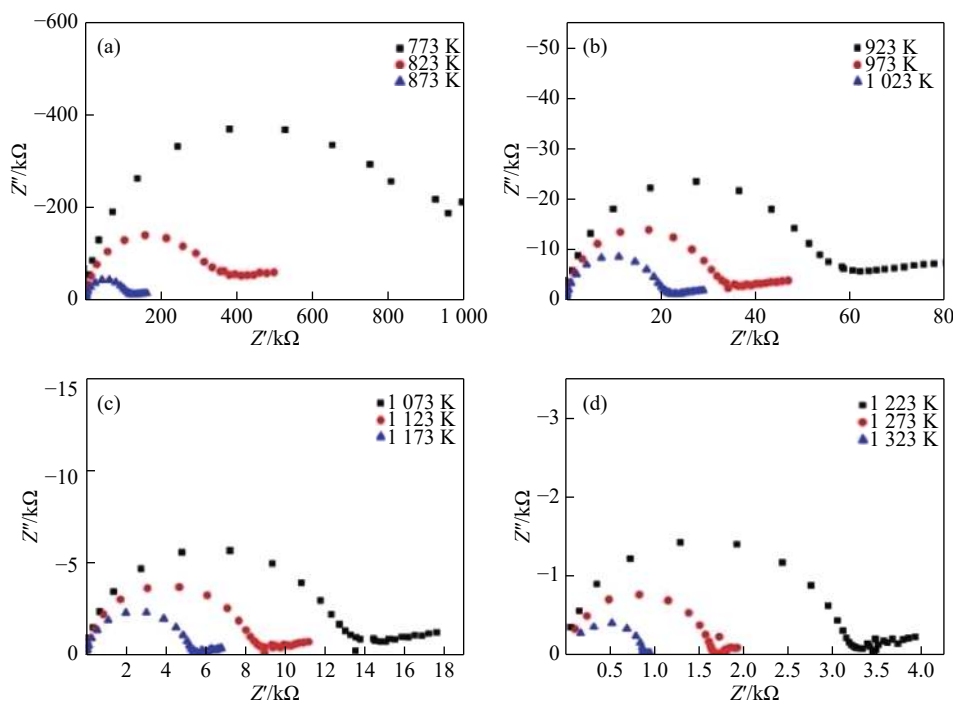


图 3 1.0 GPa、773~1 373 K 条件下样品的复阻抗谱

Fig. 3 Complex impedance spectra of the samples at 1.0 GPa and 773—1 373 K

利用电阻与电容并联的等效电路对图 3 中的阻抗弧进行 ZVIEW 程序拟合, 得到样品的电阻和电容。分别在 0.5、1.0 和 2.0 GPa 压强下拟合得到电阻和电容, 求出样品的电导率 σ 。由图 4 可以看出, 在 0.5~2.0 GPa 压强下电导率循环测量结果有较好的重复性, 说明在测量时样品内部已经达到稳定状态。不同温度段的电导率与温度的倒数基本呈线性分布, 说明测量结果满足 Arrhenius 关系式

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

式中: σ_0 为指前因子, k 为 Boltzmann 常数, T 为绝对温度, ΔH 为激活焓。

将不同压强下样品的测量结果拟合得出电导率随温度的变化, 如图 4 所示。样品电导率在 1 173~1 223 K 时出现测量结果显著增大的现象, 该显著变化可能预示样品内部导电机制发生了变

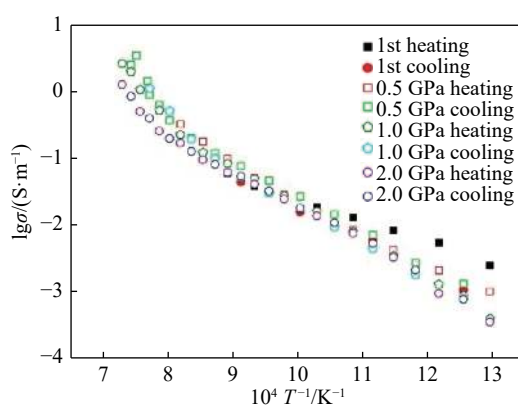


图 4 0.5~2.0 GPa 压强下电导率随温度的变化

Fig. 4 Electrical conductivity as the function of temperatures at 0.5—2.0 GPa

化。通过电镜和能谱分析,发现实验后样品的矿物成分发生了变化,黑云母(Bt)、石英(Qtz)、钠长石(Ab)明显减少而钾长石(K-feldspar)含水量增加,如图 5 所示(Mgt 表示磁铁矿)。

从图 4 可以看出:温度对电导率有很大影响,随着温度升高,电导率逐渐增大;压力对电导率的影响比较微弱,3 种压力条件下电导率结果比较接近,随着压力升高,电导率略微降低。利用线性回归得到的斜率和截距值求出样品在不同压力条件下的活化焓和指前因子,计算结果见表 2。由表 2 可知,在 773~1 223 K 温度阶段、0.5~2.0 GPa 范围内,活化焓的变化范围为 1.01~1.09 eV;在 1 223~1 373 K 温度阶段,活化焓变化范围为 2.97~2.16 eV,活化焓随压强的变化并不明显。Duba^[19] 研究认为电导率对样品化学成分、均匀性及温度具有很强的依赖性,而对压力并不具有很强的敏感性。本实验中,773~1 223 K 和 1 223~1 373 K 条件下电导率范围分别在 $10^{-3.5} \sim 10^{-0.75}$ S/m 和 $10^{-0.75} \sim 10^{0.5}$ S/m 之间变化。随着压强升高,电导率降低,在 773~1 223 K 阶段活化焓由 1.01 eV 增加到 1.09 eV;在 1 223~1 373 K 温度段活化焓由 2.97 eV 下降到 2.16 eV,但压强对电导率的影响远小于温度的影响。压强对电导率的影响可以用活化焓来表征,活化焓与压强之间存在关系

$$\Delta H = \Delta U + p\Delta V \quad (2)$$

式中: ΔU 为活化能; p 为压强; ΔV 为活化体积,单位 cm^3/mol 。通过计算获得低温和高温段的活化能 ΔU ,分别为 1.01 eV 和 2.10 eV,活化体积 ΔV 分别为 $1.63 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 和 $6.64 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 。

表 2 不同压力下花岗岩样品电导率的 Arrhenius 关系拟合参数

Table 2 Fitting parameters of Arrhenius relationship of the conductivity of granite samples under different pressures

p/GPa	T/K	$\lg \sigma_0/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	$\Delta H/\text{eV}$
0.5	773—1 223	3.53 ± 0.08	1.01 ± 0.01
	1 223—1 373	11.66 ± 1.00	2.97 ± 0.26
1.0	773—1 223	3.82 ± 0.09	1.09 ± 0.02
	1 223—1 373	8.38 ± 0.63	2.16 ± 0.16
2.0	773—1 223	3.64 ± 0.09	1.06 ± 0.02
	1 223—1 373	8.22 ± 0.59	2.21 ± 0.13

3 讨 论

3.1 导电机制

通常情况下,随着温度升高,绝大多数硅酸盐矿物的电学性质由绝缘体变为半导体。从图 4 中可以看出,电导率与 $10^4/T$ 在两个温度段内斜率发生了变化,说明样品内部导电机制也发生了变化。小极化子导电是含铁矿物的主要导电机制,前人的研究表明,小极化子导电受氧逸度和铁含量控制^[20],花岗岩样品中的黑云母含有大量 FeO,在氧逸度较高的环境下黑云母中的 Fe^{2+} 很有可能被氧化成 Fe^{3+} ,因此

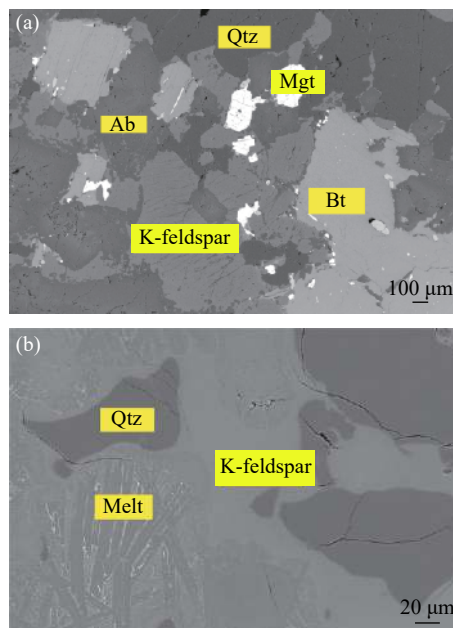


图 5 高压实验前(a)、后(b)样品的扫描电镜图像
Fig. 5 Images of scanning electron microscope for the samples before (a) and after (b) the experiment

在低温阶段样品内部的导电机制可能是小极化子导电。在高温阶段压力对电导率的影响较小,随着压力增加电导率微弱下降,与以往的研究结果^[21]较为一致,随着压强增加,电导率下降也反映了离子导电特征。Ni等^[22]研究认为硅酸盐熔体的导电机制是离子导电,而离子导电一般是通过产生阳离子空穴实现的,其微观机制为“载流子-离子”的扩散。很多实验研究^[23-24]表明硅酸盐熔体中 Na^+ 的活动性与电导率大小直接相关,本研究结果的活化焓较大,可以认为样品部分熔融时的导电机制也应该是离子导电。Jambon^[25]研究发现 K^+ 的扩散率比 Na^+ 的扩散率低了近2个数量级,说明 Na^+ 是熔体导电的主要载流子,该结论也与文献^[26-27]的研究结果一致。

3.2 与前人的研究对比

高压下花岗岩的电导率变化与黑云母脱水密切相关,本研究中先将压力升至预定值,并将温度维持在1 223 K长达12 h,在该温度条件下,黑云母发生脱水反应并使样品内部处于部分熔融状态。郭颖星等^[13]在1.0 GPa、587~1 382 K温度范围内研究黑云母花岗岩的电导率,认为在高温阶段电导率主要由黑云母脱水反应控制,脱水温度在993 K左右。黄晓葛等^[28]研究了西藏地区黑云斜长片麻岩的电导率,认为在973~1 023 K之间黑云母发生了脱水,导致电导率突然增加。Skjerlie等^[29]曾在1.0 GPa压力下进行富F英云闪长片麻岩的脱水熔融实验,研究发现:在1 148~1 223 K之间有少量熔体产生,样品的黑云母略有减少;在1 223~1 248 K之间有大量熔体产生,样品中黑云母大量消失;而在1 248~1 323 K间熔体略有增加;温度高于1 298 K后,样品中的黑云母才完全消失。Gardien等^[30]认为黑云母脱水熔融的温度区间在1 123~1 223 K,吴宗絮等^[31]认为熔融温度区间在1 085~1 110 K,而杨晓松等^[32]的研究认为在1 173 K左右。根据图4电导率随温度的变化可知,电导率的突变温度在1 223 K左右,实验前后样品扫描电镜照片显示黑云母在实验后消失,所以根据本次实验,我们认为黑云母脱水熔融温度在1 173~1 223 K附近,与Skjerlie等(1 223~1 248 K)、杨晓松等(1 173 K)和Gardien等(1 123~1 223 K)的实验结果较为接近。本研究中电导率在1 173~1 223 K附近显著增加,可能与岩石熔融程度增大导致熔体相互连通有关。

图6对比了不同条件下的花岗岩电导率。郭颖星等^[13]在1.0 GPa、990~1 382 K条件下获得青藏高原周边黑云母花岗岩的电导率为 $10^{-3.7} \sim 10^{-1.8} \text{ S/m}$,与本实验在相近温压条件下得到的电导率 $10^{-2} \sim 10^{-0.5} \text{ S/m}$ 相差1.5个数量级左右。Chen等^[15]做了无水花岗质熔体电导率实验,通过对比数据发现,在相近温度下本研究的电导率略高于花岗质熔体。Guo等^[14]在高温高压下测量不同含水量花岗质熔体的电导率发现,随着含水量增加,电导率也随之增大,当含水量大于8.4%时,电导率整体高于本实验测量的结果。对比4种花岗质岩石的电导率结果,总结出下述3个主要原因导致电导率测量结果差别较大。

(1)样品制备不同。郭颖星等^[13](2017)的实验样品为天然柱状黑云母花岗岩,Guo等^[14](2018)和Chen等^[15](2018)所用样品均为花岗质熔体玻璃,而本实验的初始样品为花岗岩粉末样品。

(2)实验条件不同。郭颖星等(2017)对黑云母花岗岩在587~1 382 K温度下采取直接测量,本研究则先让样品在腔体内1 223 K条件下反应12 h,使含水矿物完全脱水,再测量其电导率,这也是本实验结果与郭颖星等(2017)结果存在差异的主要原因。即使黑云母在973~1 023 K范围内脱出层间水,但是否会立刻有熔体产生,产生的熔体是否连通?根据我们的研究结果推测,即使在973~1 023 K时黑云母开始脱水,但样品并没有发生熔融,随着温度继续升高,在1 023 K时样品内熔体累积到一定程度,达到连通导致电导率发生突变。

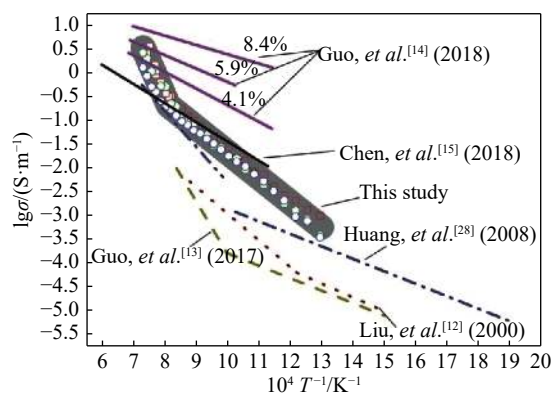


图6 花岗岩电导率实验结果对比

Fig. 6 Comparison of the conductivity results in this work with previous data

(3) 花岗岩中的矿物含量、成分以及含水量也会导致电导率结果产生一定的差异。

3.3 对西藏地壳高导层的解释

目前大地电磁检测数据显示喜马拉雅造山带上地壳部分地区存在高导异常点^[33], 从地震波速资料结果中也发现, 在高导异常区域往往有地震波低速异常点出现^[34]。Arora 等^[4]在喜马拉雅山脉西北部的大地电磁(MT)剖面中发现雅鲁藏布江缝合带南部 15~20 km 至北部 25 km 深度范围内存在高导层, 其电导率分别为 0.03 S/m 左右和 0.1~0.2 S/m。Unsworth 等^[35]得到的西藏南部的 MT 剖面结果也显示, 雅鲁藏布江以南上地壳(18~20 km)和上地壳浅部(10~13 km)的深度范围内存在高导层, 其电导率分别可达 0.3 S/m 左右和 0.05~0.1 S/m。是什么因素导致青藏高原地壳具有高导性? Nelson 等^[36]认为藏北中地壳部分熔融广泛发育, 凡是低速带明显、电导率高的地方地壳中部分熔融所占据的比例越大; Spratt 等^[37]认为壳内物质局部熔融是藏南高导层存在的原因; 魏文博等^[38]认为藏北高导层成因是部分熔融形成的, 而藏南则是部分熔融和构造破坏作用导致流体共同作用的结果; Fu 等^[39]通过花岗岩热物理性质测量也认为藏南高导层是由部分熔融所致。虽然对青藏高原地壳高导层的成因目前还存在不同看法, 但是研究表明, 地壳的低阻层与地下介质的部分熔融、塑变、流变等物质状态的改变等有密切关系。为了验证这些高导层是否可以用花岗岩的部分熔融来解释, 需要确定青藏高原地壳高导层对应的温度区间, 部分地球物理和岩石学研究^[40-42]表明青藏高原中部和北部的地壳温度分别为 $(1\ 173 \pm 50)$ K 和 $(1\ 123 \pm 50)$ K。根据最近的一个地球动力学模型^[43], 西藏南部地壳的最高温度可能是 (973 ± 50) K。因此, 将高导层区域的地壳温度区间模型限定在 973~1223 K 范围内, 而在该温度区间内本次实验电导率值在 0.016~0.310 S/m 之间, 与大地电磁测深数据较好地吻合, 如图 7 所示。该结果预示西藏地区地壳高导层的成因与部分熔融有着密切关系, 花岗岩熔体可能是高导层的主要物质成分。

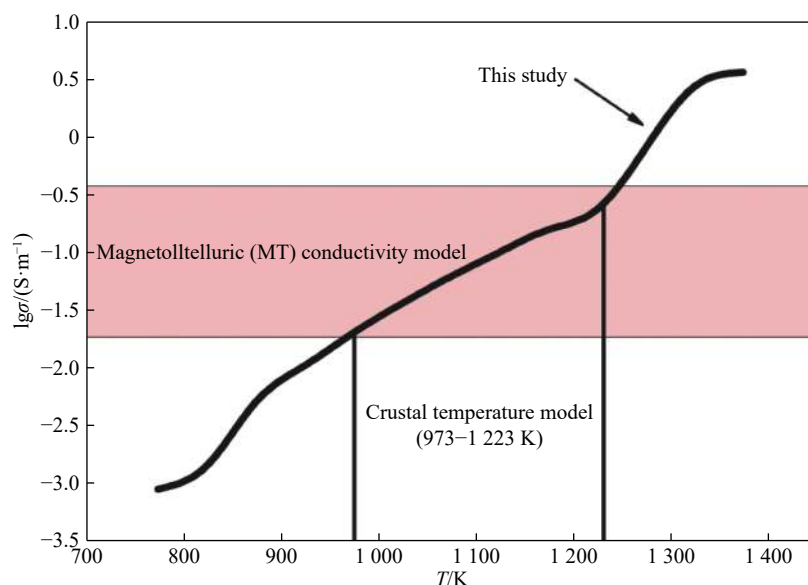


图 7 基于实验室电导率模型与大地电磁结果对比

Fig. 7 Comparison of laboratory-based conductivity profile established with the result of the upper crust derived from MT conductivity model

4 结 论

利用交流阻抗谱法在 0.5~2.0 GPa、773~1 373 K 条件下对花岗岩的电导率进行实验分析, 实验结果表明: 阻抗对频率有很强的依赖性, 样品电阻随温度升高而减小, 表现出半导体的导电性质。花岗岩电导率的对数值与 $10^4/T$ 表现出较好的线性关系, 二者满足 Arrhenius 关系式, 说明随着温度升高花岗岩电导率值不断增加, 随着压强增加电导率微弱下降。我们认为花岗岩部分熔融的导电机制由离子主导

(主要是 Na^+ 的迁移)。通过与大地电磁观测数据对比发现,实验所得花岗岩部分熔融时的电导率数据与西藏地壳温度在 973~1 223 K 时的电导率值吻合较好,说明该区域的地壳高导异常可能是由于花岗岩部分熔融引起的。

参考文献:

- [1] LAŠTOVIČKOVÁ M. A review of laboratory measurements of the electrical conductivity of rocks and minerals [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1991, 66(1/2): 1–11.
- [2] YANG X Z, KEPLER H, MCCAMMON C, et al. Effect of water on the electrical conductivity of lower crustal clinopyroxene [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B4): B04208.
- [3] 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(7043): 746–749.
- [4] ARORA B R, UNSWORTH M J, RAWAT G. Deep resistivity structure of the northwest Indian Himalaya and its tectonic implications [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(4): L04307.
- [5] CALDWELL W B, KLEMPERER S L, RAI S S, et al. Partial melt in the upper-middle crust of the northwest Himalaya revealed by Rayleigh wave dispersion [J]. *Tectonophysics*, 2009, 477(1/2): 58–65.
- [6] WEI W B, UNSWORTH M, JONES A, et al. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies [J]. *Science*, 2001, 292(5517): 716–719.
- [7] GUO Z F, WILSON M. The Himalayan leucogranites: constraints on the nature of their crustal source region and geodynamic setting [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 360–376.
- [8] SEARLE M P, COTTLE J M, STREULE M J, et al. Crustal melt granites and migmatites along the Himalaya: melt source, segregation, transport and granite emplacement mechanisms [J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2010, 100(1/2): 219–233.
- [9] STREULE M J, SEARLE M P, WATERS D J, et al. Metamorphism, melting, and channel flow in the Greater Himalayan Sequence and Makalu leucogranite: constraints from thermobarometry, metamorphic modeling, and U-Pb geochronology [J]. *Tectonics*, 2010, 29(5): TC5011.
- [10] OLHOEFT G R. Electrical properties of granite with implications for the lower crust [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, 86(B2): 931–936.
- [11] SHANOV S, YANEV Y, LASTOVICKOVA M. Temperature dependence of the electrical conductivity of granite and quartz-monzonite from South Bulgaria: geodynamic inferences [J]. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 2000, 3(2): 13–19.
- [12] 柳江琳, 白武明, 孔祥儒, 等. 高温高压下花岗岩、玄武岩和辉橄岩电导率的变化特征 [J]. *地球物理学报*, 2001, 44(4): 528–533.
LIU J L, BAI W M, KONG X R, et al. Electrical conductivity of granite, basalt and pyroxene peridotite under high temperature-high pressure conditions [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(4): 528–533.
- [13] 郭颖星, 王多君, 周永胜, 等. 青藏高原南部花岗岩电导率研究及地球物理应用 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 60(8): 1522–1532.
GUO Y X, WANG D J, ZHOU Y S, et al. Electrical conductivities of two granite samples in southern Tibet and their geophysical implications [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2017, 60(8): 1522–1532.
- [14] GUO X, ZHANG L, SU X, et al. Melting inside the Tibetan crust? Constraint from electrical conductivity of peraluminous granitic melt [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(9): 3906–3913.
- [15] CHEN J Y, GAILLARD F, VILLAROS A, et al. Melting conditions in the modern Tibetan crust since the Miocene [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3515.
- [16] 王多君, 易丽, 谢鸿森, 等. 交流阻抗谱法及其在地球深部物质科学中的应用 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(1): 123–129.
WANG D J, YI L, XIE H S, et al. Impedance spectroscopy and its application to material science of the Earth's interior [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 123–129.
- [17] DAI L D, KARATO S I. Electrical conductivity of wadsleyite at high temperatures and high pressures [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 287(1/2): 277–283.

- [18] XIE H S, ZHOU W G, ZHU M X, et al. Elastic and electrical properties of serpentinite dehydration at high temperature and high pressure [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002, 14(44): 11359–11363.
- [19] DUBA A. Electrical conductivity of olivine [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(14): 2483–2494.
- [20] ROBERTS J J, TYBURCZY J A. Frequency dependent electrical properties of dunite as functions of temperature and oxygen fugacity [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1993, 19(8): 545–561.
- [21] 徐有生. 地幔矿物岩石的电导率研究进展 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(1): 229–237.
XU Y S. A review on the electrical conductivity of mantle minerals and rocks [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(1): 229–237.
- [22] NI H W, HUI H J, STEINLE-NEUMANN G. Transport properties of silicate melts [J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(3): 715–744.
- [23] 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.
- [24] LAUMONIER M, GAILLARD F, SIFRE D. The effect of pressure and water concentration on the electrical conductivity of dacitic melts: implication for magnetotelluric imaging in subduction areas [J]. *Chemical Geology*, 2015, 418: 66–76.
- [25] JAMBON A. Tracer diffusion in granitic melts: experimental results for Na, K, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba, Ce, Eu to 1 300 °C and a model of calculation [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1982, 87(B13): 10797–10810.
- [26] GUO X, ZHANG L, BEHRENS H, et al. Probing the status of felsic magma reservoirs: constraints from the P - T - H_2O dependences of electrical conductivity of rhyolitic melt [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 433: 54–62.
- [27] POMMIER A, GAILLARD F, PICHAVANT M, et al. Laboratory measurements of electrical conductivities of hydrous and dry Mount Vesuvius melts under pressure [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B5): B05205.
- [28] 黄晓葛, 白武明, 周文戈. 高温高压下黑云斜长片麻岩的电性研究 [J]. *高压物理学报*, 2008, 22(3): 237–244.
HUANG X G, BAI W M, ZHOU W G. Experimental study on electrical conductivity of biotite-and plagioclase-bearing gneiss at high temperature and high pressure [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2008, 22(3): 237–244.
- [29] SKJERLIE K P, JOHNSTON A D. Fluid-absent melting behavior of an F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures: implications for the generation of Anorogenic Granites [J]. *Journal of Petrology*, 1993, 34(4): 785–815.
- [30] GARDIEN V, THOMPSON A B, GRUJIC D, et al. Experimental melting of biotite+plagioclase+quartz+muscovite assemblages and implications for crustal melting [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B8): 15581–15591.
- [31] 吴宗絮, 邓晋福, WYLLIE P J. 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(1): 12–18.
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(1): 12–18.
- [32] 杨晓松, 金振民, HUENGES E, et al. 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(10): 867–871.
YANG X S, JIN Z M, HUENGES E, et al. Dehydration and melting experiment of high Himalayan biotite and plagioclase bearing gneiss: implications for deep crustal melting on the Tibetan plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(10): 867–871.
- [33] PHAM V N, BOYER D, THERME P, et al. Partial melting zones in the crust in southern Tibet from magnetotelluric results [J]. *Nature*, 1986, 319(6051): 310–314.
- [34] BROWN L D, ZHAO W J, NELSON K D, et al. Bright spots, structure, and magmatism in southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling [J]. *Science*, 1996, 274(5293): 1688–1690.
- [35] UNSWORTH M J, JONES A G, WEI W, et al. Crustal rheology of the Himalaya and Southern Tibet inferred from magnetotelluric data [J]. *Nature*, 2005, 438(7064): 78–81.
- [36] NELSON K D, ZHAO W J, BROWN L D, et al. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: synthesis of project INDEPTH results [J]. *Science*, 1996, 274(5293): 1684–1688.
- [37] SPRATT J E, JONES A G, NELSON K D, et al. Crustal structure of the India-Asia collision zone, southern Tibet, from INDEPTH MT investigations [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2005, 150(1/2/3): 227–237.
- [38] 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等. 西藏高原中、北部断裂构造特征: INDEPTH(III)-MT 观测提供的依据 [J]. *地球科学*, 2006, 31(2): 257–265.
WEI W B, JIN S, YE G F, et al. Features of the faults in center and North Tibetan Plateau: based on results of INDEPTH (III)-MT [J]. *Earth Science*, 2006, 31(2): 257–265.

- [39] FU H F, ZHANG B H, GE J H, et al. Thermal diffusivity and thermal conductivity of granitoids at 283—988 K and 0.3—1.5 GPa [J]. *American Mineralogist*, 2019, 104(11): 1533–1545.
- [40] HACKER B R, RITZWOLLER M H, XI E J. Partially melted, mica-bearing crust in Central Tibet [J]. *Tectonics*, 2014, 33(7): 1408–1424.
- [41] MECHIE J, SOBOLEV S V, RATSCHBACHER L, et al. Precise temperature estimation in the Tibetan crust from seismic detection of the α - β quartz transition [J]. *Geology*, 2004, 32(7): 601–604.
- [42] WANG Q, HAWKESWORTH C J, WYMAND, et al. Pliocene-Quaternary crustal melting in central and northern Tibet and insights into crustal flow [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11888.
- [43] WANG C Y, CHEN W P, WANG L P. Temperature beneath Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 375: 326–337.

Experimental Conductivity of Partial Melt Granite at High Temperature and Pressure

WANG Shuangjie¹, YI Li¹, WANG DuoJun², SHEN Kewei², HAN Kenan¹

(1. *Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China;*

2. *School of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Magnetotelluric (MT) surveys reveal that high conductivity layer appear in the upper crust beneath Tibet. Granite is the main rocks composed of upper crust, playing an important role in the process of crustal evolution. Electrical conductivity of granite during partial melting is of great significance to understanding the conductivity structure of Tibetan Plateau crust and the crustal evolution process. Electrical conductivity of granite collected from the Tibet was conducted under the conditions of 0.5 – 2.0 GPa and 773 – 1 373 K. The activation enthalpies of 1.01 – 1.09 eV and 2.16 – 2.97 eV are derived from 773 to 1 223 K and from 1 223 to 1 373 K, respectively. The change of activation enthalpy in different temperature zones may be related to the partial melting of granite induced by the biotite dehydration. Combining the experimental results and geothermal gradient of Tibet, we found that the experimental conductivity values fell between 0.016 S/m and 0.310 S/m in the temperature range of 973 – 1 223 K, which was in good agreement with the magnetotelluric sounding data. This may indicate that there is a close relationship between the genesis of the high conductivity layer and the partial melting of granite.

Keywords: high temperature and high pressure; conductivity; granite; partial melting