

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.219>



实验矿物物理的发展现状与趋势:1.相变和状态方程、电导率、热导率

张宝华¹,毛竹²,刘锦³,叶宇⁴,孙伟⁴,郭新转⁵,刘兆东⁶,郭璇²

1. 浙江省地学大数据与地球深部资源重点实验室,浙江大学地球科学学院,浙江杭州 310027
2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽合肥 230026
3. 北京高压科学研究中心,北京 100094
4. 中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074
5. 中国科学院地球化学研究所,贵州贵阳 550081
6. 吉林大学地球科学学院、超硬材料国家重点实验室,吉林长春 130061

摘要: 实验矿物物理是高温高压实验地球科学的重要分支学科之一,它主要是通过高温高压实验模拟地球内部的物理化学环境,并原位测定地球深部物质(矿物、岩石和熔/流体等)的相变和状态方程、电导率、热导率等物理参数,探讨地球内部的圈层结构、物质组成、地球动力学过程等地球物理性质相关的一系列重要科学问题.综述了实验矿物物理的发展历史、近二十年的研究现状与趋势,并展望了该学科未来发展的方向、关键科学问题与面临的主要挑战.

关键词: 实验矿物物理;相变和状态方程;电导率;热导率;发展现状与趋势;矿物学.

中图分类号: P574

文章编号: 1000-2383(2022)08-2714-15

收稿日期: 2022-01-15

Recent Progress and Perspective of Experimental Mineral Physics: 1. Phase Transition and Equation of State, Electrical Conductivity and Thermal Conductivity

Zhang Baohua¹, Mao Zhu², Liu Jin³, Ye Yu⁴, Sun Wei⁴, Guo Xinzhuan⁵, Liu Zhaodong⁶, Guo Xuan²

1. Key Laboratory of Geoscience Big Data and Deep Resource of Zhejiang Province, School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
3. Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research (HPSTAR), Beijing 100094, China
4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
5. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
6. State Key Laboratory of Superhard Materials, School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130012, China

Abstract: Experimental mineral physics is one of the important branches of high-temperature and high-pressure experimental Earth science. The primary objectives of experimental mineral physics are to in situ determine phase transition and the state equation, conductivity, thermal conductivity and other physical properties for geomaterial (including minerals, rocks and melt/fluid) through high-temperature and high-pressure experiments to simulate the physical and chemical environment inside the Earth. By using these available

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 42042007, 41973065, 41773056).

作者简介: 张宝华 (1978-), 男, 研究员, 主要从事高温高压矿物物理研究. ORCID: 0000-0002-1239-1569. E-mail: zhangbaohua@zju.edu.cn

引用格式: 张宝华, 毛竹, 刘锦, 叶宇, 孙伟, 郭新转, 刘兆东, 郭璇, 2022. 相变和状态方程、电导率、热导率. 地球科学, 47(8): 2714-2728.

Citation: Zhang Baohua, Mao Zhu, Liu Jin, Ye Yu, Sun Wei, Guo Xinzhuan, Liu Zhaodong, Guo Xuan, 2022. Phase Transition and Equation of State, Electrical Conductivity and Thermal Conductivity. *Earth Science*, 47(8): 2714-2728.

physical properties, it is crucial for understanding many important scientific problems related to the layered structure, chemical composition and geodynamic process of the Earth. In this paper, the research history, recent progress and perspectives of experimental mineral physics in the past twenty years are reviewed, and the future direction, key scientific problems and main challenges of this discipline are also prospected.

Key words: experimental mineral physics; phase transition and equation of state; electrical conductivity; thermal conductivity; progress and perspective; mineralogy.

0 引言

实验矿物物理,主要是通过高温高压实验模拟地球内部的物理、化学条件,并原位测定地球深部物质(矿物、岩石和熔/流体等)的相变和状态方程、电导率、热导率等物理性质,以此来解决与地球内部的圈层结构、物质组成、动力学过程等地球物理性质相关的一些科学问题.地球内部本身是一个极端条件下的天然高温高压实验室,从地球莫霍面(Moho)的 ~ 1.0 GPa 和 ~ 650 °C到地心的 364 GPa 和 $6\,400 \pm 600$ °C,不同深度范围内具有不同的稳定

矿物相(图1).由于地球内部直接采样的深度非常有限,高温高压实验研究是正演地球内部结构和物质组成最直接、最重要的手段之一,已经成为人类探索地球深部的“明灯”,可以准确地获得深部矿物的物理和化学属性,再结合地球物理学探测数据和地质学观测,就能了解地球内部物质组成与性质,从而更好地回答“地球内部如何运行?”这一重大前沿科学问题.由此可见,实验矿物物理与实验岩石学、实验地球化学、地球物理学(包括地震学、大地电磁学、重力学等)等不同学科之间已高度融合.

广义上的实验矿物物理应该说早期是与地震

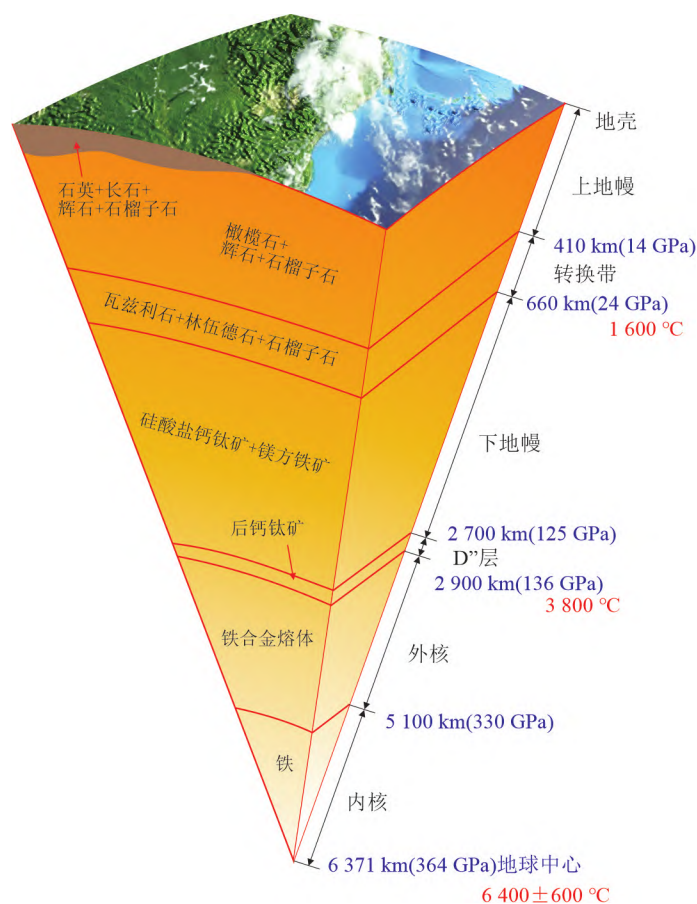


图1 地球内部的圈层结构与成分

Fig.1 Layered structure and composition of the Earth interior

据周春银和金振民(2014)

学的发展密切相关的,20世纪50年代以前主要偏重于理论研究.固体地球物理学家Oldham(1906)和Gutenberg(1913)首先发现了地核并确定地球外核是液态的,后来Lehmann(1936)发现并证实了固体地球内核的存在.Murnaghan(1937)和Birch(1938)为材料在高压条件下的压缩行为奠定了理论基础,Francis Birch于1952年发表了关于材料状态方程的里程碑论文“Elasticity and the Constitution of the Earth's Interior”(Birch, 1952).20世纪70年代以前是高温高压实验矿物物理发展的初期阶段,涌现出了一大批杰出人物,像Bridgman, P. W., Akimoto, S., Ringwood, A.E.,等.这一时期主要有两方面的进展,一是静高压实验技术的快速发展,特别是Bridgman, P.W.建立了世界真正的第一台高温高压设备,并将其应用到地球科学领域.二是地球内部矿物的高温高压合成,世界上第一个实验室合成的高压矿物柯石英(Coes, 1953)、林伍德石(Ringwood, 1959)、斯石英(Stishov and Popova, 1961)、hcp铁(Takahashi and Bassett, 1964)就是在这时期报道的.高温高压实验研究获得的相变条件和过程、物理性质与各种热力学和动力学参数,对于正确诠释地质学观察和地球物理数据(特别是地震学观测)起到了不可或缺的重要作用.

20世纪70~90年代末是高温高压实验矿物物理的发展阶段,同步辐射技术在这一时期被应用到高温高压研究领域,随着活塞圆筒压机、DIA型、Kawai型大腔体压机出现和金刚石压腔技术的进一步完善,实验矿物物理的各个方面(如下所述)都取得了长足发展.大腔体压机由于能够产生的压力和温度相对较低(<70 GPa, $<2\ 500$ °C),关注较多的是地壳、上地幔、过渡带和下地幔顶部深度范围内,温度和压力对矿物的相变和状态方程、电导率和热导率的影响,莫霍面、410 km、520 km、660 km间断面的物理化学性质与状态,这为解释地震波波速突变的成因机制、认识地球内部层圈结构和物质组成提供了关键依据(Akimoto and Fujisawa, 1968; Ringwood, 1975; Ito and Takahashi, 1989; Katsura *et al.*, 1998),奠定了实验矿物物理学的基础.金刚石压腔技术通过不断减小金刚石压砧台面直径,再结合激光加热技术,极大地拓展了研究的压力和温度范围,使得从岩石圈底部到地心温压条件下研究地球内部物质物性成为可能.尤其是对确定核幔物质成分,理解在地幔不同深度存在的物质

横向不均一性,明确核幔边界复杂速度结构成因和地球深内部物质循环的相关关系,揭示地核物质随深度变化规律与复杂界面成因等问题上,提供了关键实验证据和支持(Shim *et al.*, 2001; Lin *et al.*, 2013).

进入21世纪以来,各种先进的同步辐射微区分析技术、谱学技术、原位测试技术、激光加热等技术的日趋完善.在静高压实验领域,随着烧结金刚石和纳米聚晶金刚石压砧的应用,已将传统大压机采用碳化钨材料做二级压砧的压力上限(~ 70 GPa)推到了120 GPa(Yamazaki and Ito, 2020),但其价格昂贵,目前还未大规模推广应用.另一方面,金刚石是自然界最硬的材料,目前金刚石压腔技术所能达到的压力为 ~ 700 GPa,已经广泛且高效地应用于下地幔、地核以及超行星内部的物理化学性质研究.现阶段金刚石压腔常用的加温手段,包括电阻丝外加温(可达1 000 °C)和激光加温(可达 $\sim 6\ 000$ °C以上)可以涵盖整个地幔乃至地核的温度-压力条件,其研究对象和研究内容也在不断拓展.

1 实验矿物物理的发展现状与趋势

真正意义上的实验矿物物理学的研究历史是比较短的,也就是从20世纪70年代以后近50年才发展起来的.实验矿物物理的蓬勃发展与高温高压实验技术和物性原位测量方法的进步是唇齿相依、互相促进的.特别是上世纪70年代中后期以来,同步辐射光源与高温高压实验装置的结合,极大地推动了实验矿物物理研究的发展和解决了一系列地质学领域的重大科学问题.总的来说,实验矿物物理学领域几乎所有重大实验技术发明和突破性科学成果都是由美国、欧洲和日本等发达国家的科学家完成的,他们在该领域处于领先地位.目前我国还缺乏有国际影响力的稳定学术团队,尚未建成类似美国卡内基研究所、布鲁克海文国家实验室、阿贡国家实验室、德国拜罗伊特大学巴伐利亚地质研究所和波茨坦地学研究中心、日本东京大学、冈山大学、爱媛大学等世界知名的高温高压研究团队.从20世纪70年代开始,我国高温高压实验研究的先驱、中国科学院地球化学研究所谢鸿森研究员等人进行了艰难的矿物物理实验探索(谢鸿森, 1997).由于实验设备和测量技术的限制,2000年以前,国产大腔体压机设备能够达到的最大压力不超过5 GPa,因此极大地限制了我们对地球深部的全面认

识. 2000年以后,通过引进先进的高温高压实验设备和引入具有国际视野的研究人才,以及增强与国外先进实验室的国际合作,高温高压实验矿物物理已经有了可喜进步和起色.

近二十年来实验矿物物理主要关注的科学问题包括:(1)地球内部挥发分(特别是水)赋存状态、含量与分布,及其对地幔矿物物理性质的影响(Peslier *et al.*, 2017; Xia *et al.*, 2019; Zhang and Xia, 2021);(2)下地幔和地核的物质成分与动力学过程;(3)行星的结构、成分与演化.我国高温高压实验矿物物理的研究成果逐年增加,研究方向的覆盖面也迅速拓展,在应用大腔体压机测量矿物岩石的相变、电学、热学等物理性质,应用金刚石压腔测量高压布里渊散射和红外谱学、状态方程等方向上比较具有优势,相关的研究方法、技术创新和体系研究成果也得到了国际同行广泛的关注和引用,为地球物理和地球化学数据解释和地球深部过程的探讨提供了实验依据.下面我们将对实验矿物物理最重要的3个参数(相变和状态方程、电导率、热导率)的研究现状和趋势进行详细介绍(本文不包括波速和弹性方面的内容,请见本期专辑的另一篇文章).

1.1 相变和状态方程

矿物高压相变是地球深部物质循环过程的内在驱动力,是探知地球内部圈层结构和物质组成的重要途径之一.高温高压矿物相变研究与深部地震学观测相结合,为我们探索地幔的圈层结构提供了重要的实验约束.例如地震学研究关注度最高的410 km和660 km深处全球性的地震不连续面,以及局部地区观测到的520 km地震不连续面,按深度依次对应着橄榄石($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ (α 相)向瓦兹利石(β 相)(Lebedev *et al.*, 2002),瓦兹利石(β 相)向林伍德石(γ 相)的相转变(Saikia *et al.*, 2008),以及后尖晶石相变[林伍德石分解为布里奇曼石($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ 和铁方镁石($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$)](Irifune *et al.*, 1998).在此基础上,人们把从410~660 km的地幔深度范围称作为地幔过渡带,由橄榄石的高压相(β 和 γ 相)占主导地位,是地幔中非常重要的一个圈层.而后尖晶石相变的克拉珀珑斜率为负值,对660公里界面处的物质能量交换有阻碍作用,因此该界面也通常被视为上下地幔的分界面,在地幔动力学模拟中也扮演着至关重要的角色.在2003年之前,人们认为地下大约660~2 900 km下地幔的($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ 和($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$)矿物组合相对单调、缺少变

化.然而,随着第三代同步辐射光源微区表征能力的极大提升,以及激光加热和金刚石压腔高压技术的联合使用,在实验室中成功模拟了下地幔温度压力环境,并可以对微米尺寸的样品在高温高压下进行原位测量.自2003年以来,地球深部矿物科学迎来了一系列重大突破.

后尖晶石相变(Liu, 1976),铁电子高低自旋状态的改变(Badro *et al.*, 2003; Lin *et al.*, 2005)以及后钙钛矿相变(Murakami *et al.*, 2004)是矿物物理实验在地球深部研究中的三大里程碑式成就.前人关于上地幔矿物物性测试和相变规律研究大部分是在大腔体压机中进行的,而关于下地幔的研究一般采用金刚石压腔技术.需要指出的是,在关于后尖晶石相变的实验研究中,采用不同的压力标定物质(如铂、金、氧化镁),得到的相变压力差别可高达近3 GPa (Shim *et al.*, 2001),而1 GPa相当于约30 km的地幔深度.这极大地促进了我们对压力标定状态方程的研究(Fei *et al.*, 2007; Tange *et al.*, 2010).准确的压标状态方程有助于我们将高温高压实验结果与地球物理观测相结合,合理推测地球深部的圈层结构及矿物岩石的物理化学性质.

Badro *et al.*(2003, 2004)发现在地下1 500 km及更深处环境下,铁方镁石和布里奇曼石中铁原子的电子结构将发生高低自旋态转变,该二级相变对下地幔含铁矿物的物理化学性质具有重要影响.2004年,两个研究团队先后报道了在2 500 km及更深处布里奇曼石发生高压相变,转变为后钙钛矿结构,对下地幔底部的地球物理观测、核幔边界的热演化等具有重要启示(Murakami *et al.*, 2004; Oganov and Ono, 2004).在接下来的十多年中,全球上百个研究组竞相对下地幔主要矿物($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ 和($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$)的相变、状态方程等物理化学属性开展高温高压研究.其中,国内知名学者巫翔教授团队和毛竹教授团队对下地幔硅酸盐体系和铁方镁石的自旋相变、状态方程以及成分效应等性质开展了一系列研究工作(Mao *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2016, 2017).目前该方向上研究程度较高,相关成果发表论文近万篇.

下地幔主要矿物铁方镁石[($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$)]在地下1 000~1 800 km深度范围内(大约40~80 GPa),遇水不稳定发生新型高压化学反应,生成六方富氧相($(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{O}_3\text{X}$,其中X代表其管状结构中赋存的挥发分氧、氢或羟基(Liu *et al.*, 2021);($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$ 在

1 800~2 900 km 深度遇水反应生成含氢(Mg, Fe) O_2 , 具有与含氢 FeO_2 同样的黄铁矿相立方晶体结构, 其中镁含量可高达 70 mol% (Hu *et al.*, 2021). MgO_2 端元在 下地幔温度压力条件下可以稳定存在, 表明(Mg, Fe) O_2 结构中的镁含量可能高于 70~90 mol% (Lobanov *et al.*, 2015). 在 80 GPa 及以上, 含氢 FeO_2 相中的铁处于电子低自旋状态, 此时镁和铁的有效离子半径相差无几, 故可以形成含氢 MgO_2 - FeO_2 固溶体(Liu *et al.*, 2019). 由此可见, 在常规含镁氧化物和硅酸盐矿物中, 一个镁原子按照价态平衡对应于一个氧原子; 然而, 在 $(Fe, Mg)_2O_3X$ 晶体结构中, 镁原子对应着更多的氧原子. 通过部分氧原子之间的相互作用形成部分共价键, 导致在六方富氧相中可以赋存额外的氧(Liu *et al.*, 2021). 随着压力升高到 80 GPa 以上, 氧原子之间的相互作用增强, 在含氢 FeO_2 结构中形成氧氧双键(Liu *et al.*, 2019). 这两种富氧相 M_2O_3X 和 MO_2 结构中可容纳超常规的氧含量(M 代表金属原子; X 代表挥发分), 它们可能在 下地幔中广泛存在, 亟需开展深入研究.

1.2 电导率

矿物岩石的电导率实验研究指通过有效控制温度、压力、氧逸度等条件, 测定矿物、岩石、熔/流体的电导率. 相比于热导、重力、密度等地球物理参数, 电导率非常特殊, 其对温度、矿物中的微量成份的变化(如铁、钠、水、氟等)、具有连通性的高导物质(如颗粒边界熔体/含水流体、石墨、金属等)的含量与分布非常敏感. 因而, 可以通过联合地球物理资料(大地电磁测深)及矿物岩石的电导率实验数据, 在宏观及相对微观的尺度上对地球深部的物理化学条件(如温度、压力、氧逸度)、物质组成与空间展布等进行更好的约束. 随着电导率测试实验技术的进步, 过去使用的直流固频法(Hinze *et al.*, 1981)、低频交流法(Yoshino *et al.*, 2006)由于无法去除极化效应、有效识别电极反应电阻的弊端, 逐渐被宽频扫描交流阻抗谱法(Roberts and Tyburczy, 1991, 1993)所取代. 宽频扫描交流阻抗谱法可以准确区分所测样品内不同导电机制的贡献, 被广泛用于固相样品(包括单晶及多晶样品)、流体-固体两相样品以及熔/流体样品的电导率测试.

耶鲁大学学者 Katsura (1993) 通过 Nernst-Einstein 方程计算提出: 微量的、以缺陷的形式进入橄榄石的水可以显著提升其电导率, 极大激发了各国

高压实验工作者研究水在提升名义上无水矿物电导率上的热情. 到目前为止, 基本上建立了大多数壳幔矿物的电导率与水含量之间的定量关系(Huang *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2006; Yoshino *et al.*, 2006, 2008, 2009; Dai and Karato, 2009; Yang *et al.*, 2011, 2012; Zhang *et al.*, 2012, 2019a; Zhao and Yoshino, 2016), 结合地球物理观测资料定量估算了地球各圈层的含水量. 其中代表性的工作:(1)是对地幔过渡带可能含水量的估算(Huang *et al.*, 2005; Yoshino *et al.*, 2008), 但是他们的实验结果相差较大, 对过渡带水含量的认识相反;(2)挥发分对地幔矿物电导率的影响以及对上地幔和俯冲带高导异常的启示. 挥发分中除了 H 对名义上无水矿物电导率有显著影响外, 最近 Li *et al.* (2017) 报道了 F 对金云母电导率的显著提升作用, 提示 F 在硅酸盐矿物中发挥着与 H 类似的作用;(3)各国学者对影响矿物岩石电导率的其他各因素(如温度、压力、氧逸度、铁含量、粒径、铁自旋状态等)进行了大量的电导率实验研究(Dai *et al.*, 2008; Yoshino *et al.*, 2011, 2017; Yoshino and Katsura, 2013; Guo and Yoshino, 2014; Liu *et al.*, 2021; Zhang and Xia, 2021; Zhang *et al.*, 2021), 使我们可以更清楚地认识地球内部的组成及物理化学条件.

由于电导率对具有连通性的高导物质非常敏感, 电导率原位测试还被用来研究:(1)硅酸盐及碳酸盐熔体对全岩电导率的影响(Roberts and Tyburczy, 1999; Yoshino *et al.*, 2010);(2)含水矿物的脱水过程及其对全岩电导率的影响(Manthilake *et al.*, 2015, 2016; Chen *et al.*, 2018);(3)高导物质在地球内部固相体系内的连通性及其与温度、时间之间的关系(Yoshino *et al.*, 2004; Yamazaki *et al.*, 2014);(4)颗粒边界薄膜在时间尺度上的稳定性(Yoshino and Noritake, 2011; Zhang and Yoshino, 2017). 近年来随着技术的进步, 已经可以在高温高压下对含水熔/流体以及固-液(挥发性)体系进行电导率原位测试(Ni *et al.*, 2011; Shimojuku *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2015, 2016; Sun *et al.*, 2020), 很好地约束了壳幔及俯冲带中高导异常的熔/流体成因. 另一项技术上的重要突破是在剪切变形条件下原位测量发生部分熔融样品的电导率各向异性(Zhang *et al.*, 2014; Zhang and Yoshino, 2020), 证明剪切变形条件下的熔体定向分布是东太平洋隆

起下软流圈内的电导率强各向异性的起因。

综上,近20年已积累大量壳幔岩石、矿物、熔/流体的电导率数据。但是由于电导率测量组装的复杂性、影响电导率测量数据的因素众多、难以控制实验组装内的水逸度条件等因素影响,目前还存在以下问题:(1)大腔体压机的实验温度、压力无法覆盖整个地球深部的温压条件,目前最高实验温度、压力只局限在下地幔顶部的温压条件(Yoshino *et al.*, 2016)。虽然使用金刚石压腔技术目前最高能够测得D"层后钙钛矿的电导率(Ohta *et al.*, 2008),但是温度的误差较大。因此,压力对下地幔矿物电导率的影响以及高温条件下的离子导电机制(Fei *et al.*, 2020)的相关研究很薄弱,且缺乏地核物相在相关温压下的实验数据(Zhuang *et al.*, 2021);(2)各研究小组实验数据存在明显差别(Huang *et al.*, 2005; Yoshino *et al.*, 2008),其原因尚不明晰,甄别有效实验数据比较困难;(3)在对含水矿物以及含缺陷水的名义上无水矿物的电导率实验研究中,由于样品仓材料无法提供密封环境,电导率测试基本上都在低水逸度条件下完成,导致测量过程中样品在较低温度就出现部分脱水现象(Yoshino and Katsura, 2009; Guo *et al.*, 2013),影响观测较高温度的质子导电机制及实验结果的准确性。

1.3 热导率

热传导是自然界普遍存在的现象,其在地球的热场和磁场的演化发展过程中起到了至关重要的作用。因此,研究地球主要矿物在高温高压下的热传导特性(如:热导率,热扩散系数和比热容等),对于我们构建地球内部的热力学和动力学模型,确定时空关系下地热梯度和地幔对流状态,进而对认识岩浆海冷却、核幔分异和板块俯冲的演化过程等具有重要意义。近40年来,随着高温高压实验技术的飞速发展,逐渐开发出多种热导率原位测量方法,如:稳态热流法(Beck *et al.*, 1978)、热光栅法(Chai *et al.*, 1996)、周期热流法(Xu *et al.*, 2004)、脉冲加热法(Osako *et al.*, 2004)、时域热反射法(Hsieh *et al.*, 2009)等,为研究地球内部的对流状态和热场演化提供了大量可靠的实验数据。例如,结合金刚石压腔的超高压技术和激光脉冲加热的方法,关于 ϵ -铁的热导测量目前已经达到地球核幔边界的温压条件(~ 130 GPa, $\sim 3\ 200$ °C)(Konôpková *et al.*, 2016)。基于大腔体压机的高温热导测量,其测量的压力从上个世纪90年代的上地幔压力(~ 9 GPa,

180 km 深度)(Katsura, 1995)大幅提升到地幔过渡带的下部压力(~ 20 GPa, 600 km 深度)(Xu *et al.*, 2004)。利用这些技术手段,目前获得了大量的矿物的热导系数和热扩散系数,为我们探索地球深部的热梯度和对流状态提供了重要的线索和依据。

现阶段,主要通过大腔体压机和金刚石压腔来开展地球深部的硅酸盐矿物和岩石、铁合金以及非结晶相的热导率和热扩散系数的高温高压实验测量。其中基于大腔体压机的热导测量主要采用脉冲加热法,优势是能够同时获得高温高压下的热导率和热扩散系数。由于传统的碳化钨顶砧能够模拟的压力范围仅仅达到下地幔中部的压力条件(< 70 GPa),因此该方法集中在测量地壳、上地幔和地幔过渡带的硅酸盐矿物和非结晶相:橄榄石、瓦兹利石和林伍德石(Katsura, 1995; Xu *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2019b, 2019c)、辉石(Wang *et al.*, 2014)、石榴石(Osako *et al.*, 2004)、长石(Xiong *et al.*, 2021)、花岗岩(Miao *et al.*, 2014; Fu *et al.*, 2019)、橄榄岩(Ge *et al.*, 2021)、硅酸盐玻璃(Katsura, 1993)等。基于金刚石压腔的热导率测量主要包括热光栅法、脉冲加热法、时域热反射法等。由于金刚石压腔的样品小,放大了金属电极吸热效应的影响,因此脉冲加热法测量的热导率和热扩散系数不够准确(Beck *et al.*, 2007)。近年来中国台湾中央研究院的谢文斌研究员团队致力于将金刚石压腔与时域热反射法相结合,针对地幔的主要矿物开展了高压下的系统测量(Hsieh *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2017; Marzotto *et al.*, 2020)。尤其是他们通过测量含水橄榄石的热导系数,首次发现了羟基在高压下显著降低硅酸盐矿物的热传导特性,为低温俯冲板块在地球深部的演化以及俯冲板块中橄榄石的迟滞相变提供了新的思路(Chang *et al.*, 2017)。由于时域热反射法主要利用样品表面的金属镀层对于温度的敏感变化来测量样品的吸热系数,传统的激光加热方法导致样品表面产生很大的热梯度,因此目前时域热反射法只能局限在常温高压的测量,亟待加热方法的突破。

硅酸盐和氧化物中铁的自旋状态在下地幔会发生改变(Lin *et al.*, 2013),导致硅酸盐矿物的热传导特性发生突变。现阶段,针对下地幔主要矿物,如布里奇曼石、铁方镁石、斯石英等,基于大腔体压机的热导测量局限在下地幔顶部区域(Manthilake *et al.*, 2011),无法反应铁自旋状态的改变对矿物

热导系数的影响。相反,结合金刚石压腔的时域热反射法虽然目前只能进行常温热导率测量(Ohta *et al.*, 2012; Hsieh *et al.*, 2017, 2018),但是能够实现核幔边界的压力条件(~130 GPa),从而揭示含铁矿物在下地幔的热导突变。这些热导系数的测量对于理解下地幔的热场分布以及揭示下地幔观测到的剪切波低速带、超低速带的成因和演化起到重要的作用(Hsieh *et al.*, 2017, 2018)。

地核由铁-轻元素合金组成,其热导率决定了维持地球发电机的热流最小值,是确定内外核是否存在物质对流、推断内核的年龄和冷却速率的关键参数(Buffett *et al.*, 2000)。地核物质的高温高压热导测量是近期实验地球科学研究的热点和难点。测量地核物质热导系数的方法主要通过金刚石压腔采用瞬时激光加热法和电阻测量法。前者利用脉冲激光在高压下加热样品直接获得样品表面的温度分布和热导系数(Konôpková *et al.*, 2016; Hsieh *et al.*, 2020),其结果与地磁观测的推论相吻合(Pozzo *et al.*, 2012);而后者在高压常温下测量铁-轻元素合金的电阻,根据威德曼-弗朗兹定律间接获得热导系数(Gomi and Hirose, 2015; Ohta *et al.*, 2016),其结果与理论计算的结果相吻合。目前两种实验方法的测量结果存在巨大的分歧,通过激光加热技术测量的铁-轻元素合金的热导率显著低于电阻测量的转化结果,解决这个分歧对于了解地核的热循环和地球磁场演化,揭示内外核对流状态和核幔元素迁移过程有指导意义。因此亟待未来开展更多的工作。

尽管通过高温高压实验积累了大量地幔和地核矿物的热导数据,但矿物热导的研究仍存在许多问题,下地幔主要矿物的热导实验测量与下地幔温压条件存在较大的差距,而引入更先进的高压技术将显著缩小差距。比如引入纳米多晶金刚石顶砧,可以将大腔体压机模拟的压强上限推进到~120 GPa(Yamazaki and Ito, 2020);引入外置加热技术,可以将金刚石压腔模拟的稳定温度上限推进到~1 000 °C(Mao *et al.*, 2012)。另外,掺杂元素和缺陷可以影响声子迁移的自由程,从而影响矿物的热导性质。现阶段除了少量的针对含水矿物的测量(Chang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019b; Marzotto *et al.*, 2020),关于成分变化,颗粒大小以及氧逸度对矿物热导的研究十分匮乏。同时,含水矿物的热导测量局限在高压常温,羟基水对于矿物热导系数

的衰减作用在高温下是否显著依然是未解之谜。这些问题为未来开展下地幔的热导测量工作提供了思路 and 方向。关于地核的热导研究,目前的研究对象局限在简单的铁硅合金和铁镍合金,亟待未来逐步开展关于其他轻元素,比如氢、氧,以及多元合金体系对于地核物质热导特性的影响。随着大腔体压机高压技术的进一步推进、金刚石压腔加热技术的改善,实现对下地幔和地核矿物的高温高压热导测量将未来可期。

综上所述,在过去的几十年中,通过活塞圆筒、大腔体压机和金刚石压腔等实验设备,并结合同步辐射光源等各种原位谱学技术在地球内部物质的相变、状态方程、电导率、热导率等物理性质测量方面已经取得了丰硕成果。但是,仍然还有很多未解决的难题。特别是,尽管大腔体压机能够提供比金刚石压腔更加准确的高温高压实验数据,但是目前常规碳化钨二级顶砧能够达到的压力范围非常有限(<70 GPa)。相反,虽然金刚石压腔能够达到超高压,但是样品腔极小且温度测量误差大。未来一方面需要在大腔体压机上引入烧结金刚石压砧作为二级顶砧,将实验压力上限推进到核幔边界~135 GPa;另一方面,需要将金刚石外加热或激光加热技术进一步完善,尽量减小温度梯度,以便能够更好地开展下地幔及地核物质的矿物物理性质测量。与此同时,还应该开展地质熔/流体(富水流体、硅酸盐熔体、硫化物熔体、金属熔体、超临界流体等)和部分熔融在深部地幔甚至地核条件下密度、结构、分布、电导率、热导率等物理性质的实验研究,这是已有矿物物理研究的薄弱点。

随着高温高压实验平台与原位测量技术的不断进步,地质地球化学和地球物理观测结果的进一步积累、扩展和精细化,当前实验矿物物理呈现出如下发展趋势:(1)分析测试的精度和技术要求越来越高,未来 nanoSIMS、FIB 等现代测试技术必不可少;(2)研究内容正在变得更加广泛和深入,不同学科之间的交叉融合将更紧密,所获得的认识正在朝着更加系统、精准和统一的方向发展;(3)行星科学研究方向正逐渐变成国际前沿和热点;(4)高温高压实验地球科学在解决三极(南极、北极、青藏高原)、三深(深海、深地、深空)的科学探索等方面具有广阔的应用前景。

2 实验矿物物理学科未来发展的关

键科学问题与挑战

2.1 研究背景

地球内部物质在高温高压下的物理性质(相变、状态方程、电导率、热导率等)和相互作用是认识和了解地球内部圈层结构、物质组成、状态、动力学等科学问题最重要的参数,同时亦是利用地球物理探测结果,通过数值模拟反演地球内部动力学过程、层圈形成演化和各种不连续界面的空间位置与展布的必备参数。

先进的高温高压实验模拟平台和原位测量技术对推动地球深部物质属性与过程的深入研究起到了至关重要的作用。当前高温高压实验地球科学在技术上主要展现出两个重要特点,一是实验装置实现更高更稳定的温度、压力以及更大的样品空间。目前在大腔体压机上使用普通碳化钨二级顶砧可以达到70 GPa,使用烧结金刚石最大可以达到120 GPa (Yamazaki and Ito, 2020),不过温度相对都比较低($<2\ 500\ ^\circ\text{C}$)(图2a)。金刚石压腔在常温下可以达到地心压力364 GPa,但是同时实现高温和高压仍然存在很大的技术挑战。采用外加热技术最高温度能够达到 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 。使用激光加热技术能够达到 $\sim 5\ 800\ ^\circ\text{C}$ 及以上(图2b),但是温度梯度和温度测量误差很大,并且也很难长时间保持。二是高温高压实验技术与原位分析测试技术的进一步融合。从高温高压淬火到常温常压的过程中样品可能发生多种变化,造成原始信息的丢失。开展高温高压条件下的原位实时测量已成为实验地球科学的重要发展方向,金刚石压腔与包括同步辐射在内的多项光谱分析技术的结合已经十分成熟,但受各

方面条件限制,在大压机上开展原位测量仍有待进一步发展,国内的同步辐射光源平台上大腔体压机高压实验线站的建设亟需大力推进。特别是随着压力不断升高,样品空间急剧减小,从而使得地球内部物质物性测量极其困难。已有的地幔矿物物理性质(相变、状态方程、电导率、热导率等)的原位测量技术需要进一步改进优化,同时仍需要不断开发新的实验方法。

2.2 关键科学问题

地球和其他行星的起源以及内部的运行机制是地球科学长期以来需要回答的基本科学问题。经过近七十年的发展,随着高温高压实验技术和原位测试技术的不断进步,特别是高温高压实验装置与同步辐射光源的紧密结合,实验矿物物理在对地壳、上地幔、地幔过渡带物质的物性测量(相变、状态方程、电导率、热导率等)已经取得了巨大进展。然而在地球深部(特别是下地幔和地核)与新兴的行星科学研究领域,由于实验技术手段限制,仍有很多重要的科学问题有待解决(但并不局限于这些问题):

(1)地质流体、熔体和部分熔融物质的物理化学性质及其地质效应,特别是地球深部熔/流体的成分、含量与分布对解释地球深部一些重要地球物理学观测具有重要意义,比如上地幔底部(400 km)和下地幔顶部(700 km)的低速高导异常,大剪切波低速省(large low shear velocity provinces,简称LLSVPs)与超低速区(ultralow velocity zones,简称ULVZs)的成因等。

(2)下地幔的成分、结构与动力学过程,包括俯

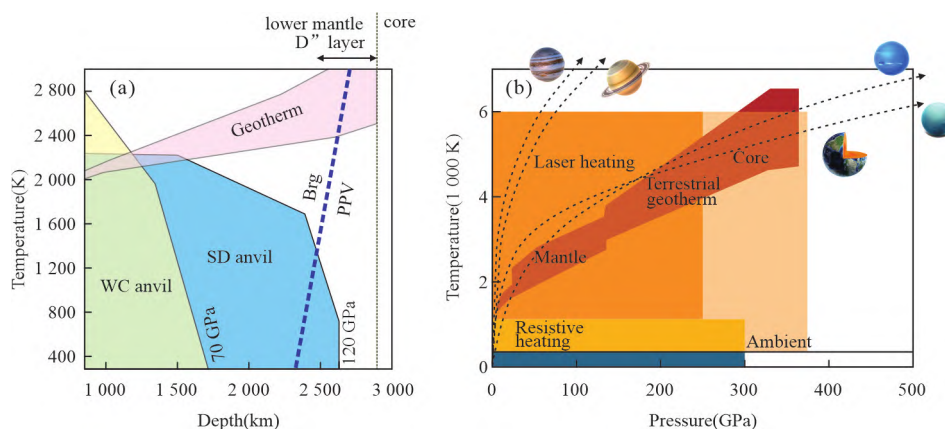


图2 (a)大腔体压机(large volume press,简称LVP)和(b)金刚石压腔(diamond anvil cell,简称DAC)能够达到的温压范围

Fig.2 Pressure and temperature ranges for (a) large volume press (LVP) and (b) diamond anvil cell (DAC)

据 Yamazaki and Ito(2020)

冲板片物质在整个下地幔条件下的物理化学性质,以及下地幔刚发现的新相如 Phase H、 FeO_2H_x 等与亟待发现的新物质。

(3) 内外核物质组成和动力学过程,轻元素的种类、含量、分配等对内外核物理性质的影响(Hirose *et al.*, 2021; Lv and Liu, 2022),以及内外核物质交换和能量传递的宏观效应。

(4) 类地行星、气态行星和冰行星的物质组成和内部结构。

2.3 主要研究方向和应对策略

针对上述提到的关于地球和行星内部物质组成、结构、动力学、起源和演化过程等科学问题,高温高压实验矿物物理未来的主要研究方向包括但不限于:

2.3.1 深部地幔条件下流体、熔体和部分熔融体系的物性测量 板块俯冲将挥发分从地表带入地球内部,挥发分通过矿物相变和脱水、部分熔融、岩浆分异等一系列物理和化学过程发生迁移,熔/流体在上升过程中会与上覆地幔楔发生水化反应等交代作用,有时会引发地幔楔的部分熔融,最终通过俯冲带火山喷发的方式返回地表。另一方面,部分挥发分可能被俯冲板片携带至过渡带甚至下地幔,经历更长期、更复杂的迁移和演化历程(Hu *et al.*, 2016)。由于地质熔/流体(富水流体、硅酸盐熔体、碳酸盐熔体、硫化物熔体、金属熔体、超临界流体等)是地球深部物质交换和能量传递的重要载体,研究其密度、结构、状态方程、电导率、热导率等物理性质,有助于更好地理解地球内部的结构、成分和动力学过程(Ni *et al.*, 2015),解释地震学和大地电磁观测结果,特别是阐明 LLSVPs、ULVZs 和 D" 层的起源。

2.3.2 下地幔矿物的电导率和热导率等物性测量 目前只有金刚石压腔(DAC)可以开展涵盖地心压力范围(本文只强调静高压)的高温高压实验,但是由于 DAC 实验中样品小、温压梯度大等原因,常与大腔体压机(LVP)实验结果不一致。虽然 LVP 能够克服 DAC 的困难,但是由于实验技术瓶颈,当前在 LVP 上只能开展下地幔中部温压条件下(<70 GPa, $2\ 500\ ^\circ\text{C}$),布里奇曼石、铁方镁石和其他稳定相的电导率和热导率(Yoshino *et al.*, 2016; Fei *et al.*, 2017),这极大地限制了我们获取下地幔深部物质的物理性质。未来急需利用烧结金刚石做二级压砧将下地幔物性测量拓展到 120 GPa 的压力

(Yamazaki and Ito, 2020),甚至更高。同时也包括挥发分(C、H、N等)在下地幔的溶解度与储量的高温高压实验约束,下地幔条件下含水相 Phase H、 FeO_2H_x 等的相变、状态方程、电导率和热导率,以及挥发分对名义上无水矿物,如布里奇曼石、铁方镁石、毛钙硅石 CaSiO_3 等的相变、状态方程、电导率和热导率的影响。

2.3.3 LIPs、LLSVPs、ULVZs 和 D" 层的成因 大火成岩省(large igneous provinces, LIPs)是由短时间内($<1\sim 2$ 百万年)巨量($>$ 百万 km^3)喷发的巨量岩浆岩构成的,是地球内部岩浆活动在地表最宏伟的展现。LIPs 的成因一直以来都是地球科学界最具争议的热点问题之一,有学者认为 LIPs 可能与下地幔底部 LLSVPs 密切相关(Liu *et al.*, 2017)。利用地震层析成像(特别是 V_s 速度结构)对下地幔 LLSVPs 异常的存在、位置、大小、形状和强度达成了一些共识,未来如何将地球化学、地球物理、地球动力学等研究方法结合起来共同探究 LLSVPs 仍然面临极大挑战:水对地幔对流的模式和 LLSVPs 成因的影响是什么?LLSVPs 在多大程度上代表了热量和成分的非均质性,以及这种非均质性的来源是什么(Garnero and McNamara, 2008)?LLSVPs 的起源及其如何随着时间而演化?LLSVPs 是代表了在地球早期岩浆洋中“冻结”的结构,还是它们是动态的、不断变化的结构?LLSVPs 在整个地球时间内是相对固定在深地幔中,还是其形式、位置和性质会发生变化的瞬变结构?

此外,下地幔底部的超低速带(ULVZs)是近年来国际地学研究的热点。ULVZs 与 LLSVPs 的关系是什么(图 3)?水在 ULVZs 和中尺度构造的起源和演化中扮演的角色是什么?含水熔体在地幔底部的特性(如速度、密度)和行为(如赋存状态、结构、动态稳定性)对 ULVZs 和 D" 层各向异性的影响?这些都是需要深入探讨的重要科学问题。

2.3.4 内外核物质组成及其物性测量 在地核相应温度和压力下,获得成分变化对金属铁密度、相变、状态方程、热导率等的影响;确定内外核轻元素的含量和种类;明确内外核物质交换和热量传递对外核对流模式、地球磁场形成的影响(Konôpková *et al.*, 2016);确定不同成分下内外核边界的精细结构并揭示内核生长过程。

2.3.5 行星物质组成和物性研究 深空探测科学研究是我国战略基础研究之一,以明确行星的结构

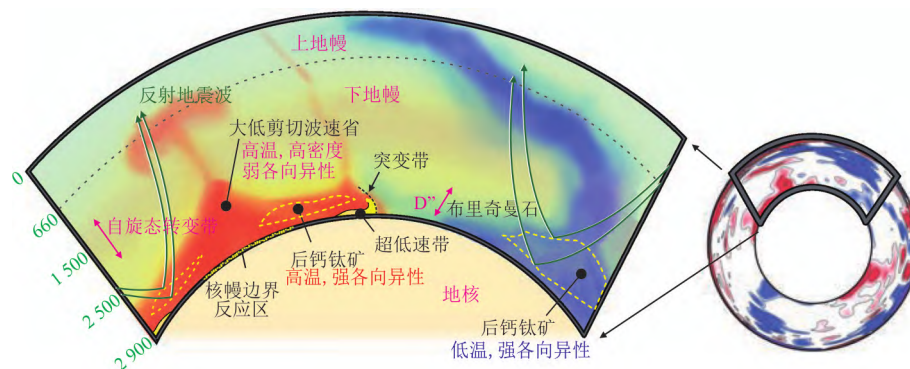


图 3 下地幔的结构与动力学

Fig.3 Structure and geodynamics of the lower mantle

据 Garnero and McNamara(2008)

和物质组成,认识太阳系各类天体和太阳系起源为总体目标.与类地行星/卫星主要由硅酸盐矿物组成不同,以木星、天王星、冥王星、泰坦星为代表的气态行星和冰行星以及卫星内部还含有大量的氢、水、氨、甲烷、盐(KCl, NaCl)等物质,其温度可以从表面约零下 200 °C 随深度增加快速增长到数万度 (Guillot, 2005; Journaux *et al.*, 2017; Helled *et al.*, 2020). 因此,在更为广阔的温压条件范围,更复杂和多变的物质组成,通过实验室模拟由硅酸盐矿物构成的类地行星/卫星(火星、金星、月球等)、气态行星(木星、土星等)和冰行星(天王星、海王星、冥王星等)内部物质(氢、水、氨、甲烷、盐等)的结构、密度、相变、状态方程、电导率、热导率、熔融曲线等性质,是深入理解这些行星内部的物质组成、圈层结构和演化机制的重要手段,是揭示其内部排气过程和大气组成的关键 (Guillot, 2005; Journaux *et al.*, 2017; Helled *et al.*, 2020; Stevenson, 2020). 显然,与行星相关科学问题的解决未来需要应用地球物理学、实验矿物物理学、实验地球化学和实验岩石学等多学科交叉的研究方法与手段.

致谢:感谢中国地质大学(武汉)章军锋教授和吉林大学许文良教授投稿,两位匿名审稿人对本文提出了详细修改意见,在此一并致谢.

References

- Akimoto, S. I., Fujisawa, H., 1968. Olivine-Spinel Transition in the System Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 at 800 °C. *Earth and Planetary Science Letters*, 1(4): 237–240. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(66\)90076-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(66)90076-8)
- Badro, J., Fiquet, G., Guyot, F., et al., 2003. Iron Partitioning in Earth's Mantle: Toward a Deep Lower Mantle Discontinuity. *Science*, 300(5620): 789–791. <https://doi.org/10.1126/science.1081311>

- Badro, J., Rueff, J. P., Vanko, G., et al., 2004. Electronic Transitions in Perovskite: Possible Nonconvecting Layers in the Lower Mantle. *Science*, 305(5682): 383–386. <https://doi.org/10.1126/science.1098840>
- Beck, A. E., Darbha, D. M., Schloessin, H. H., 1978. Lattice Conductivities of Single-Crystal and Polycrystalline Materials at Mantle Pressures and Temperatures. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 17(1): 35–53. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(78\)90008-0](https://doi.org/10.1016/0031-9201(78)90008-0)
- Beck, P., Goncharov, A. F., Struzhkin, V. V., et al., 2007. Measurement of Thermal Diffusivity at High Pressure Using a Transient Heating Technique. *Applied Physics Letters*, 91(18): 181914. <https://doi.org/10.1063/1.2799243>
- Birch, F., 1938. The Effect of Pressure Upon the Elastic Parameters of Isotropic Solids, According to Murnaghan's Theory of Finite Strain. *Journal of Applied Physics*, 9(4): 279–288. <https://doi.org/10.1063/1.1710417>
- Birch, F., 1952. Elasticity and Constitution of the Earth's Interior. *Journal of Geophysical Research*, 57(2): 227–286. <https://doi.org/10.1029/jz057i002p00227>
- Bridgman, P. W., 1958. *Physics of High Pressure*. G Bell and Sons, London.
- Buffett, B. A., Garnero, E. J., Jeanloz, R., 2000. Sediments at the Top of Earth's Core. *Science*, 290: 1338–1342.
- Chai, M., Brown, J. M., Slutsky, L. J., 1996. Thermal Diffusivity of Mantle Minerals. *Physics and Chemistry of Minerals*, 23(7): 470–475. <https://doi.org/10.1007/bf00202033>
- Chang, Y. Y., Hsieh, W. P., Tan, E., et al., 2017. Hydration-Reduced Lattice Thermal Conductivity of Olivine in Earth's Upper Mantle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(16): 4078–4081. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616216114>
- Chen, S. B., Guo, X. Z., Yoshino, T., et al., 2018. Dehy-

- dration of Phengite Inferred by Electrical Conductivity Measurements: Implication for the High Conductivity Anomalies Relevant to the Subduction Zones. *Geology*, 46(1): 11–14. <https://doi.org/10.1130/g39716.1>
- Coes, L., 1953. A New Dense Crystalline Silica. *Science*, 118(3057): 131–132. <https://doi.org/10.1126/science.118.3057.131>
- Dai, L. D., Karato, S. I., 2009. Electrical Conductivity of Pyrope-Rich Garnet at High Temperature and High Pressure. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 176(1/2): 83–88. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.04.002>
- Dai, L. D., Li, H. P., Hu, H. Y., et al., 2008. Experimental Study of Grain Boundary Electrical Conductivities of Dry Synthetic Peridotite under High-Temperature, High-Pressure, and Different Oxygen Fugacity Conditions. *Journal of Geophysical Research*, 113(B12): 211. <https://doi.org/10.1029/2008jb005820>
- Fei, Y. W., Ricolleau, A., Frank, M., et al., 2007. Toward an Internally Consistent Pressure Scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(22): 9182–9186. <https://doi.org/10.1073/pnas.0609013104>
- Fei, H., Huang, R., Yang, X., 2017. CaSiO₃-Perovskite May Cause Electrical Conductivity Jump in the Topmost Lower Mantle. *Geophysical Research Letters*, 44: 10226–10232. <https://doi.org/10.1002/2017gl075070>
- Fei, H. Z., Druzhbin, D., Katsura, T., 2020. The Effect of Water on Ionic Conductivity in Olivine. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(3): 1–15. <https://doi.org/10.1029/2019jb019313>
- Fu, H. F., Zhang, B. H., Ge, J. H., et al., 2019. Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Granitoids at 283–988 K and 0.3–1.5 GPa. *American Mineralogist*, 104(11): 1533–1545. <https://doi.org/10.2138/am-2019-7099>
- Gamero, E. J., McNamara, A. K., 2008. Structure and Dynamics of Earth's Lower Mantle. *Science*, 320(5876): 626–628. <https://doi.org/10.1126/science.1148028>
- Ge, J. H., Zhang, B. H., Xiong, Z. L., et al., 2021. Thermal Properties of Harzburgite and Dunite at 0.8–3 GPa and 300–823 K and Implications for the Thermal Evolution of Tibet. *Geoscience Frontiers*, 12(2): 947–956. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.01.008>
- Gomi, H., Hirose, K., 2015. Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Hcp Fe-Ni Alloys under High Pressure: Implications for Thermal Convection in the Earth's Core. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 247: 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.04.003>
- Guillot, T., 2005. The Interiors of Giant Planets: Models and Outstanding Questions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1): 493–530. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120325>
- Guo, X. Z., Yoshino, T., 2014. Pressure-Induced Enhancement of Proton Conduction in Brucite. *Geophysical Research Letters*, 41(3): 813–819. <https://doi.org/10.1002/2013gl058627>
- Guo, X. Z., Yoshino, T., 2013. Electrical Conductivity of Dense Hydrous Magnesium Silicates with Implication for Conductivity in the Stagnant Slab. *Earth and Planetary Science Letters*, 369–370: 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.03.026>
- Guo, X. Z., Yoshino, T., Shimojuku, A., 2015. Electrical Conductivity of Albite-(Quartz)-Water and Albite-Water-NaCl Systems and its Implication to the High Conductivity Anomalies in the Continental Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 412(2): 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.12.021>
- Guo, X., Zhang, L., Behrens, H., et al., 2016. Probing the Status of Felsic Magma Reservoirs: Constraints from the P-T-H₂O Dependences of Electrical Conductivity of Rhyolitic Melt. *Earth and Planetary Science Letters*, 433: 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.10.036>
- Gutenberg, B., 1913. Über die Konstitution der Erdinnern, Erschlossen aus Erdbebenbeobachtungen. *Physika Zeitschrift*, 14: 1217–1218.
- Helled, R., Nettelmann, N., Guillot, T., 2020. Uranus and Neptune: Origin, Evolution and Internal Structure. *Space Science Reviews*, 216(3): 1–26. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00660-3>
- Hinze, E., Will, G., Cemič, L., 1981. Electrical Conductivity Measurements on Synthetic Olivines and on Olivine, Enstatite and Diopside from Dreiser Weiher, Eifel (Germany) under Defined Thermodynamic Activities as a Function of Temperature and Pressure. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(3): 245–254. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90068-6](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90068-6)
- Hirose, K., Wood, B., Vočadlo, L., 2021. Light Elements in the Earth's Core. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9): 645–658. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00203-6>
- Hsieh, W. P., Chen, B., Li, J., et al., 2009. Pressure Tuning of the Thermal Conductivity of the Layered Muscovite Crystal. *Physical Review B*, 80(18): 302. <https://doi.org/10.1103/physrevb.80.180302>
- Hsieh, W. P., Deschamps, F., Okuchi, T., et al., 2017. Reduced Lattice Thermal Conductivity of Fe-Bearing Bridgmanite in Earth's Deep Mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(7): 4900–4917. <https://doi.org/10.1002/2017jb014339>
- Hsieh, W. P., Deschamps, F., Okuchi, T., et al., 2018. Effects of Iron on the Lattice Thermal Conductivity of Earth's Deep Mantle and Implications for Mantle Dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(16): 4099–4104. <https://doi.org/10.1073/pnas.1718557115>

- Hsieh, W. P., Goncharov, A. F., Labrosse, S., et al., 2020. Low Thermal Conductivity of Iron-Silicon Alloys at Earth's Core Conditions with Implications for the Geodynamo. *Nature Communications*, 11(1): 3332. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17106-7>
- Hu, Q. Y., Kim, D. Y., Yang, W. G., et al., 2016. FeO₂ and FeOOH under Deep Lower-Mantle Conditions and Earth's Oxygen-Hydrogen Cycles. *Nature*, 534(7606): 241–244. <https://doi.org/10.1038/nature18018>
- Hu, Q. Y., Liu, J., Chen, J., et al., 2021. Mineralogy of the Deep Lower Mantle in the Presence of H₂O. *National Science Review*, 8(4): 98. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa098>
- Huang, X. G., Xu, Y. S., Karato, S. I., 2005. Water Content in the Transition Zone from Electrical Conductivity of Wadsleyite and Ringwoodite. *Nature*, 434(7034): 746–749. <https://doi.org/10.1038/nature03426>
- Irifune, T., Nishiyama, N., Kuroda, K., et al., 1998. The Postspinel Phase Boundary in Mg₂SiO₄ Determined by in Situ X-Ray Diffraction. *Science*, 279: 1698–1700.
- Ito, E., Takahashi, E., 1989. Postspinel Transformations in the System Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄ and some Geophysical Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B8): 10637–10646. <https://doi.org/10.1029/jb094ib08p10637>
- Journaux, B., Daniel, I., Petitgirard, S., et al., 2017. Salt Partitioning between Water and High-Pressure Ices. Implication for the Dynamics and Habitability of Icy Moons and Water-Rich Planetary Bodies. *Earth and Planetary Science Letters*, 463: 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.01.017>
- Katsura, T., 1993. Thermal Diffusivity of Silica Glass at Pressures up to 9 GPa. *Physics and Chemistry of Minerals*, 20(3): 201–208. <https://doi.org/10.1007/bf00200122>
- Katsura, T., 1995. Thermal Diffusivity of Olivine under Upper Mantle Conditions. *Geophysical Journal International*, 122(1): 63–69. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1995.tb03536.x>
- Katsura, T., Sato, K., Ito, E., 1998. Electrical Conductivity of Silicate Perovskite at Lower-Mantle Conditions. *Nature*, 395(6701): 493–495. <https://doi.org/10.1038/26736>
- Konôpková, Z., McWilliams, R. S., Gómez-Pérez, N., et al., 2016. Direct Measurement of Thermal Conductivity in Solid Iron at Planetary Core Conditions. *Nature*, 534(7605): 99–101. <https://doi.org/10.1038/nature18009>
- Lebedev, S., Chevrot, S., van der Hilst, R. D., 2002. Seismic Evidence for Olivine Phase Changes at the 410- and 660-Kilometer Discontinuities. *Science*, 296(5571): 1300–1302. <https://doi.org/10.1126/science.1069407>
- Lehmann, I., 1936. P', Publications du Bureau Central Seismologique International, Série A. *Travaux Scientifique*, 14: 87–115.
- Li, Y., Jiang, H. T., Yang, X. Z., 2017. Fluorine Follows Water: Effect on Electrical Conductivity of Silicate Minerals by Experimental Constraints from Phlogopite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 217: 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.08.020>
- Lin, J. F., Struzhkin, V. V., Jacobsen, S. D., et al., 2005. Spin Transition of Iron in Magnesiowüstite in the Earth's Lower Mantle. *Nature*, 436(7049): 377–380. <https://doi.org/10.1038/nature03825>
- Lin, J. F., Speziale, S., Mao, Z., et al., 2013. Effects of The Electronic Spin Transitions of Iron in Lower Mantle Minerals: Implications for Deep Mantle Geophysics and Geochemistry. *Reviews of Geophysics*, 51(2): 244–275. <https://doi.org/10.1002/rog.20010>
- Liu, J., Hu, Q. Y., Young Kim, D., et al., 2017. Hydrogen-Bearing Iron Peroxide and the Origin of Ultralow-Velocity Zones. *Nature*, 551(7681): 494–497. <https://doi.org/10.1038/nature24461>
- Liu, J., Hu, Q. Y., Bi, W. L., et al., 2019. Altered Chemistry of Oxygen and Iron under Deep Earth Conditions. *Nature Communications*, 10(1): 153. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08071-3>
- Liu, J., Wang, C. X., Lv, C., et al., 2020. Evidence for Oxygenation of Fe-Mg Oxides at Mid-Mantle Conditions and the Rise of Deep Oxygen. *National Science Review*, 8(4): 96. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa096>
- Liu, H. Y., Zhang, K., Ingrin, J., et al., 2021. Electrical Conductivity of Omphacite and Garnet Indicates Limited Deep Water Recycling by Crust Subduction. *Earth and Planetary Science Letters*, 559: 116784. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116784>
- Liu, L. G., 1976. The Post-Spinel Phase of Forsterite. *Nature*, 262(5571): 770–772. <https://doi.org/10.1038/262770a0>
- Lobanov, S. S., Zhu, Q., Holtgrewe, N., et al., 2015. Stable Magnesium Peroxide at High Pressure. *Scientific Reports*, 5(1): 13582. <https://doi.org/10.1038/srep13582>
- Lv, C. J., Liu, J., 2022. Early Planetary Processes and Light Elements in Iron-Dominated Cores. *Acta Geochimica*, 218(12): 1–25. <https://doi.org/10.1007/s11631-021-00522-x>
- Manthilake, G. M., de Koker, N., Frost, D. J., et al., 2011. Lattice Thermal Conductivity of Lower Mantle Minerals and Heat Flux from Earth's Core. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(44): 17901–17904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1110594108>
- Manthilake, G., Bolfan-Casanova, N., Novella, D., et al., 2016. Dehydration of Chlorite Explains Anomalously High Electrical Conductivity in the Mantle Wedges. *Science Advances*, 2(5): 1–14. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501631>
- Manthilake, G., Mookherjee, M., Bolfan-Casanova, N., et al.,

2015. Electrical Conductivity of Lawsonite and Dehydrating Fluids at High Pressures and Temperatures. *Geophysical Research Letters*, 42(18): 7398–7405. <https://doi.org/10.1002/2015gl064804>
- Mao, Z., Lin, J. F., Liu, J., et al., 2011. Thermal Equation of State of Lower-Mantle Ferropervicite across the Spin Crossover. *Geophysical Research Letters*, 38(23): 10–25. <https://doi.org/10.1029/2011gl049915>
- Mao, Z., Lin, J. F., Liu, J., et al., 2012. Sound Velocities of Fe and Fe-Si Alloy in the Earth's Core. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(26): 10239–10244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207086109>
- Mao, Z., Lin, J. F., Yang, J., et al., 2014. (Fe, Al)-Bearing Post-Perovskite in the Earth's Lower Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 403: 157–165.
- Marzotto, E., Hsieh, W. P., Ishii, T., et al., 2020. Effect of Water on Lattice Thermal Conductivity of Ringwoodite and its Implications for the Thermal Evolution of Descending Slabs. *Geophysical Research Letters*, 47(13): 23–29. <https://doi.org/10.1029/2020gl087607>
- Miao, S. Q., Li, H. P., Chen, G., 2014. The Temperature Dependence of Thermal Conductivity for Lherzolites from the North China Craton and the Associated Constraints on the Thermodynamic Thickness of the Lithosphere. *Geophysical Journal International*, 197(2): 900–909. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu020>
- Murakami, M., Hirose, K., Kawamura, K., et al., 2004. Post-Perovskite Phase Transition in MgSiO₃. *Science*, 304(5672): 855–858. <https://doi.org/10.1126/science.1095932>
- Murnaghan, F. D., 1937. Finite Deformations of an Elastic Solid. *American Journal of Mathematics*, 59(2): 235. <https://doi.org/10.2307/2371405>
- Ni, H. W., Keppler, H., Manthilake, M. A. G. M., et al., 2011. Electrical Conductivity of Dry and Hydrated NaAl-Si₃O₈ Glasses and Liquids at High Pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(3): 501–513. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0608-5>
- Ni, H. W., Hui, H., Steinle-Neumann, G., 2015. Transport Properties of Silicate Melts. *Reviews of Geophysics*, 53(3): 715–744. <https://doi.org/10.1002/2015rg000485>
- Oganov, A. R., Ono, S., 2004. Theoretical and Experimental Evidence for a Post-Perovskite Phase of MgSiO₃ in Earth's D'' Layer. *Nature*, 430(6998): 445–448. <https://doi.org/10.1038/nature02701>
- Ohta, K., Onoda, S., Hirose, K., et al., 2008. The Electrical Conductivity of Post-Perovskite in Earth's D'' Layer. *Science*, 320(5872): 89–91. <https://doi.org/10.1126/science.1155148>
- Ohta, K., Yagi, T., Taketoshi, N., et al., 2012. Lattice Thermal Conductivity of MgSiO₃ Perovskite and Post-Perovskite at the Core-mantle Boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 349–350: 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.043>
- Ohta, K., Kuwayama, Y., Hirose, K., et al., 2016. Experimental Determination of the Electrical Resistivity of Iron at Earth's Core Conditions. *Nature*, 534(7605): 95–98. <https://doi.org/10.1038/nature17957>
- Oldham, R. D., 1906. The Constitution of the Interior of the Earth, as Revealed by Earthquakes: (Second Communication). some New Light on the Origin of the Oceans. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 63(1/2/3/4): 344–350. <https://doi.org/10.1144/gsl.jgs.1907.063.01-04.24>
- Osako, M., Ito, E., Yoneda, A., 2004. Simultaneous Measurements of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity for Garnet and Olivine under High Pressure. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 143–144: 311–320. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2003.10.010>
- Peslier, A. H., Schönbacher, M., Busemann, H., et al., 2017. Water in the Earth's Interior: Distribution and Origin. *Space Science Reviews*, 212(1/2): 743–810. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0387-z>
- Pozzo, M., Davies, C., Gubbins, D., et al., 2012. Thermal and Electrical Conductivity of Iron at Earth's Core Conditions. *Nature*, 485(7398): 355–358. <https://doi.org/10.1038/nature11031>
- Ringwood, A. E., 1959. The Olivine-Spinel Inversion in Fayalite. *American Mineralogist*, 44: 659–661.
- Ringwood, A. E., 1975. Composition and Petrology of the Earth's Mantle, McGraw-Hill, New York, 1–618.
- Roberts, J. J., Tyburczy, J. A., 1991. Frequency Dependent Electrical Properties of Polycrystalline Olivine Compacts. *Journal of Geophysical Research*, 96(B10): 16205. <https://doi.org/10.1029/91jb01574>
- Roberts, J. J., Tyburczy, J. A., 1993. Impedance Spectroscopy of Single and Polycrystalline Olivine: Evidence for Grain Boundary Transport. *Physics and Chemistry of Minerals*, 20(1): 19–26. <https://doi.org/10.1007/bf00202246>
- Roberts, J. J., Tyburczy, J. A., 1999. Partial-Melt Electrical Conductivity: Influence of Melt Composition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B4): 7055–7065. <https://doi.org/10.1029/1998jb900111>
- Saikia, A., Frost, D. J., Rubie, D. C., 2008. Splitting of the 520 Kilometer Seismic Discontinuity and Chemical Heterogeneity in the Mantle. *Science*, 319(5869): 1515–1518. <https://doi.org/10.1126/science.1152818>
- Shim, S. H., Duffy, T. S., Shen, G. Y., 2001. The Post-Spinel Transformation in Mg₂SiO₄ and Its Relation to the 660 km Seismic Discontinuity. *Nature*, 411(6837): 571–574. <https://doi.org/10.1038/35079053>
- Shimozuku, A., Yoshino, T., Yamazaki, D., et al., 2012. Electrical Conductivity of Fluid-Bearing Quartzite under

- Lower Crustal Conditions. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 198–199: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.03.007>
- Stevenson, D. J., 2020. Jupiter's Interior as Revealed by Juno. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48(1): 465–489. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-081619-052855>
- Stishov, S.M., Popova, S.V., 1961. A New Dense Modification of Silica. *Geochemistry*, 10: 923–926.
- Sun, W., Dai L., Li, H., et al., 2020. Electrical Conductivity of Clinopyroxene-NaCl-H₂O System at High Temperatures and Pressures: Implications for High-conductivity Anomalies in the Deep Crust and Subduction Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125: e2019JB019093.
- Takahashi, T., Bassett, W. A., 1964. High-Pressure Polymorph of Iron. *Science*, 145(3631): 483–486. <https://doi.org/10.1126/science.145.3631.483>
- Tange, Y., Nishihara, Y., Tsuchiya, T., 2010. Correction to “Unified Analyses for *P-V*-Tequation of State of MgO: A Solution for Pressure-Scale Problems in High *P-T* Experiments”. *Journal of Geophysical Research*, 115(B12): 3208. <https://doi.org/10.1029/2010jb007959>
- Wang, D. J., Mookherjee, M., Xu, Y. S., et al., 2006. The Effect of Water on the Electrical Conductivity of Olivine. *Nature*, 443(7114): 977–980. <https://doi.org/10.1038/nature05256>
- Wang, C., Yoneda, A., Osako, M., et al., 2014. Measurement of Thermal Conductivity of Omphacite, Jadeite, and Diopside up to 14 GPa and 1 000 K: Implication for the Role of Eclogite in Subduction Slab. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119: 6277–6287.
- Wu, X., Lin, J. F., Kaercher, P., et al., 2017. Seismic Anisotropy of the D'' Layer Induced by (001) Deformation of Post-Perovskite. *Nature Communications*, 8(1): 14669. <https://doi.org/10.1038/ncomms14669>
- Wu, X., Wu, Y., Lin, J.F., Liu, J., et al., 2016. Two-Stage Spin Transition of Iron in FeAl-Bearing Phase D at Lower Mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(9): 6411–6420. <https://doi.org/10.1002/2016jb013209>
- Xia, Q. K., Liu, J., Kovács, I., et al., 2019. Water in the Upper Mantle and Deep Crust of Eastern China: Concentration, Distribution and Implications. *National Science Review*, 6(1): 125–144. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx016>
- Xie, H.S., 1997. Introduction to Deep Earth Material Science. Science Press, Beijing, 1–297(in Chinese).
- Xiong, Z. L., Zhang, B. H., Ge, J. H., et al., 2021. Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Alkali Feldspar at 0.8-3 GPa and 300-873 K. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 176(6): 42. <https://doi.org/10.1007/s00410-021-01797-2>
- Xu, Y. S., Shankland, T. J., Linhardt, S., et al., 2004. Thermal Diffusivity and Conductivity of Olivine, Wadsleyite and Ringwoodite to 20 GPa and 1 373 K. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 143–144: 321–336. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2004.03.005>
- Yamazaki, D., Yoshino, T., Nakakuki, T., 2014. Interconnection of Ferro-Periclase Controls Subducted Slab Morphology at the Top of the Lower Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 403: 352–357. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.017>
- Yamazaki, D., Ito, E., 2020. High Pressure Generation in the Kawai-Type Multianvil Apparatus Equipped with Sintered Diamond Anvils. *High Pressure Research*, 40(1): 3–11. <https://doi.org/10.1080/08957959.2019.1689975>
- Yang, X. Z., Keppler, H., McCammon, C., et al., 2011. Effect of Water on the Electrical Conductivity of Lower Crustal Clinopyroxene. *Journal of Geophysical Research*, 116(B4): 208. <https://doi.org/10.1029/2010jb008010>
- Yang, X. Z., Keppler, H., McCammon, C., et al., 2012. Electrical Conductivity of Orthopyroxene and Plagioclase in the Lower Crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163(1): 33–48. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0657-9>
- Yoshino, T., Katsura, T., 2009. Reply to Comments on “Electrical Conductivity of Wadsleyite as a Function of Temperature and Water Content” by Manthilake et al.. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 174(1/2/3/4): 22–23. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.01.012>
- Yoshino, T., Noritake, F., 2011. Unstable Graphite Films on Grain Boundaries in Crustal Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 306(3/4): 186–192. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.04.003>
- Yoshino, T., Katsura, T., 2013. Electrical Conductivity of Mantle Minerals: Role of Water in Conductivity Anomalies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41(1): 605–628. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124022>
- Yoshino, T., Walter, M. J., Katsura, T., 2004. Connectivity of Molten Fe Alloy in Peridotite Based on in Situ Electrical Conductivity Measurements: Implications for Core Formation in Terrestrial Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(2): 625–643. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.03.010>
- Yoshino, T., Matsuzaki, T., Yamashita, S., et al., 2006. Hydrous Olivine Unable to Account for Conductivity Anomaly at the Top of the Asthenosphere. *Nature*, 443(7114): 973–976. <https://doi.org/10.1038/nature05223>
- Yoshino, T., Manthilake, G., Matsuzaki, T., et al., 2008. Dry Mantle Transition Zone Inferred from the Conductivity of Wadsleyite and Ringwoodite. *Nature*, 451(7176): 326–329. <https://doi.org/10.1038/nature06427>

- Yoshino, T., Matsuzaki, T., Shatzkiy, A., et al., 2009. Corrigendum to “The Effect of Water on the Electrical Conductivity of Olivine Aggregates and its Implications for the Electrical Structure in the Upper Mantle”. *Earth and Planetary Science Letters*, 391: 135–136. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.032>
- Yoshino, T., Laumonier, M., McIsaac, E., et al., 2010. Electrical Conductivity of Basaltic and Carbonatite Melt-Bearing Peridotites at High Pressures: Implications for Melt Distribution and Melt Fraction in the Upper Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 295(3/4): 593–602. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.04.050>
- Yoshino, T., Ito, E., Katsura, T., et al., 2011. Effect of Iron Content on Electrical Conductivity of Ferropericlase with Implications for the Spin Transition Pressure. *Journal of Geophysical Research*, 116(B4): 87–96. <https://doi.org/10.1029/2010jb007801>
- Yoshino, T., Kamada, S., Zhao, C. C., et al., 2016. Electrical Conductivity Model of Al-Bearing Bridgmanite with Implications for the Electrical Structure of the Earth's Lower Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 434(B4): 208–219. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.032>
- Yoshino, T., Zhang, B. H., Rhymer, B., et al., 2017. Pressure Dependence of Electrical Conductivity in Forsterite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(1): 158–171. <https://doi.org/10.1002/2016jb013555>
- Zhang, B. H., Ash, B., Yoshino, T., 2017. Effect of Graphite on the Electrical Conductivity of the Lithospheric Mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(1): 23–40. <https://doi.org/10.1002/2016gc006530>
- Zhang, B. H., Yoshino, T., 2020. Temperature-Enhanced Electrical Conductivity Anisotropy in Partially Molten Peridotite under Shear Deformation. *Earth and Planetary Science Letters*, 530(12): 115922. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115922>
- Zhang, B. H., Xia, Q. K., 2021. Influence of Water on the Physical Properties of Olivine, Wadsleyite, and Ringwoodite. *European Journal of Mineralogy*, 33(1): 39–75. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-39-2021>
- Zhang, B. H., Yoshino, T., Wu, X. P., et al., 2012. Electrical Conductivity of Enstatite as a Function of Water Content: Implications for the Electrical Structure in the Upper Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 357–358: 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.09.020>
- Zhang, B. H., Yoshino, T., Yamazaki, D., et al., 2014. Electrical Conductivity Anisotropy in Partially Molten Peridotite under Shear Deformation. *Earth and Planetary Science Letters*, 405: 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.08.018>
- Zhang, B.H., Zhao, C.C., Ge, J.H., et al., 2019a. Electrical Conductivity of Omphacite as a Function of Water Content and Implications for High Conductivity Anomalies in the Dabie-Sulu UHPM Belts and Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(12): 12523–12536. <https://doi.org/10.1029/2019jb018826>
- Zhang, B.H., Ge, J.H., Xiong, Z.L., et al., 2019b. Effect of Water on the Thermal Properties of Olivine with Implications for Lunar Internal Temperature. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124(12): 3469–3481. <https://doi.org/10.1029/2019je006194>
- Zhang, Y. Y., Yoshino, T., Yoneda, A., et al., 2019c. Effect of Iron Content on Thermal Conductivity of Olivine with Implications for Cooling History of Rocky Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 519(16): 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.04.048>
- Zhang, B. H., Guo, X., Yoshino, T., et al., 2021. Electrical Conductivity of Melts: Implications for Conductivity Anomalies in the Earth's Mantle. *National Science Review*, 8(11): 64. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab064>
- Zhang, L., Meng, Y., Yang, W., et al., 2014. Disproportionation of (Mg, Fe)SiO₃ Perovskite in Earth's Deep Lower Mantle. *Science*, 344: 877–882.
- Zhao, C. C., Yoshino, T., 2016. Electrical Conductivity of Mantle Clinopyroxene as a Function of Water Content and its Implication on Electrical Structure of Uppermost Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 447(20): 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.04.028>
- Zhou, C.Y., Jin, Z.M., 2014. The “Bright Lamp” into the Deep Earth: Experiments at High Pressure and High Temperature. *Chinese Journal of Nature*, 36(2): 79–88(in Chinese with English abstract).
- Zhuang, Y. K., Su, X. W., Salke, N. P., et al., 2021. The Effect of Nitrogen on the Compressibility and Conductivity of Iron at High Pressure. *Geoscience Frontiers*, 12(2): 983–989. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.04.012>

附中文参考文献

- 谢鸿森, 1997. 地球深部物质科学导论. 北京: 科学出版社, 1–297.
- 周春银, 金振民, 2014. 照亮地球深部的“明灯”——高温高压实验. 自然杂志, 36(2): 79–88.