

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.286>



## 实验矿物物理的发展现状与趋势:2.弹性和波速

毛竹<sup>1</sup>,刘兆东<sup>2</sup>,张友君<sup>3</sup>,张宝华<sup>4</sup>,孙宁宇<sup>1</sup>

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽合肥 230026
2. 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
3. 四川大学原子与分子物理研究所,四川成都 610065
4. 浙江大学地球科学学院,浙江杭州 310027

**摘要:** 弹性性质和波速是矿物重要物理性质。实验测量的弹性性质和波速与地震学观测结果的对比,是确定地球内部物质组成、理解地球内部圈层结构形成机制和揭示地球内部物质分布不均一性最为直接和重要的手段。在过去 20 年,伴随大腔体压机、金刚石压砧、同步辐射 X 光、激光加热等技术的快速发展,在地球内部相应温度和压力下测量主要构成矿物的弹性性质和波速取得了巨大进展。综述了矿物物理在地球内部矿物弹性性质和波速实验测量的发展历史、近 20 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;弹性性质;波速;高温高压;发展现状与趋势;矿物学。

中图分类号: P579

文章编号: 1000-2383(2022)08-2729-15

收稿日期: 2022-01-28

## Recent Progress and Perspective of Experimental Mineral Physics:2. Elasticity and Sound Velocity

Mao Zhu<sup>1</sup>, Liu Zhaodong<sup>2</sup>, Zhang Youjun<sup>3</sup>, Zhang Baohua<sup>4</sup>, Sun Ningyu<sup>1</sup>

1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
2. School of Earth Sciences, State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun 130061, China
3. Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China
4. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

**Abstract:** Elasticity and sound velocity are critical physical properties of minerals. Comparing the experimental sound velocity of minerals with seismic observed velocity profiles provide crucial means to constrain the composition of the Earth's deep interior, understand the formation mechanisms of the Earth's layered structure, and decipher the lateral composition variation. In the past twenty years, significant progress has been achieved in the elasticity and sound velocity measurements with the development of various high-pressure experimental techniques, including large-volume press, diamond anvil cells, synchrotron X-ray facility, laser heating, etc. Here, we review the experimental progress in the elasticity and sound velocity measurements made in the past twenty years and discuss the future research topics and challenges.

**Key words:** experimental mineral physics; elasticity; sound velocity; high pressure and temperature; progress and perspective; mineralogy.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 41874101).

**作者简介:** 毛竹(1982-),女,教授,主要从事高温高压矿物物理方向研究. ORCID: 0000-0002-6469-6954. E-mail: zhumao@ustc.edu.cn

**引用格式:** 毛竹,刘兆东,张友君,张宝华,孙宁宇,2022.弹性和波速.地球科学,47(8):2729-2743.

**Citation:** Mao Zhu, Liu Zhaodong, Zhang Youjun, Zhang Baohua, Sun Ningyu, 2022. Elasticity and Sound Velocity. *Earth Science*, 47(8): 2729-2743.

## 0 引言

地球内部物质的物理和化学性质不仅控制着地球内部的活动,也对地表的地质活动有着重要的影响.地球深部的钻探深度极为有限与稀少的来自地球深部的天然岩石样品,不能提供足够的有关地球内部的信息.因此,探测地球内部的物质组成,并由此理解地球内部圈层结构形成机制,揭示地球的演化过程,更多的还要依赖地球物理、地球化学观测和高温高压矿物岩石学实验.

地震波具有穿透整个地球的能力,可以对地球进行“X光透视”,因此岩石矿物的弹性和波速测量是认识地球内部物质组成和性质最重要的方法之一(周春银和金振民, 2014).依据全球地震台站所记录的地震数据,目前已经建立了全球地震波 PREM 与 AK135 模型(Dziewonski and Anderson, 1981; Kennett *et al.*, 1995),描绘出地球内部波速和密度随深度变化的图像.通过实验获得高温高压下地球内部主要构成物质的弹性和波速,并与地震学“深度—波速—密度”图像进行对比,这为我们制约地球内部的物质成分至关重要(图 1).特别是近年来,越来越多的地震学观测表明,即使在同一深度,不同区域的地震波并不相同,表明地球内部的物质分布存在强烈的横向分布不均一性.因此全面

系统的获得主要构成物质在地球内部相应温度和压力下的弹性和波速资料,对揭示区域性物质分布不均一性和认识地球深部物质的迁移和演化过程至关重要.

过去 20 年,同步辐射、高温高压与光谱技术的快速发展带来了弹性和波速实验测量技术的进步甚至革新.以大腔体压机和金刚石压砧为基础,多种光谱学和 X 光散射技术在测量地球内部矿物弹性和波速的实验研究中取得了丰硕的成果,更新了我们对于地球内部物质组成的诸多认识.目前实验室测量地球深部物质的波速方法主要包括:超声波干涉法(Li and Liebermann, 2014)、布里渊散射法(Duffy *et al.*, 1995; Sinogeikin and Bass, 2000)、脉冲法(Abramson *et al.*, 1997; Crowhurst *et al.*, 2008; Fu *et al.*, 2017)、X 光高能非弹散射法(Badro *et al.*, 2007; Mao *et al.*, 2012b)、冲击波法(Huang *et al.*, 2011; Duffy and Smith, 2019)等,这些实验方法通过直接或间接测定矿物波速、弹性、声子态密度以及声子寿命等,最终为我们在地球内部温度和压力条件下确定相应构成矿物的弹性和密度提供了关键制约,为确定地球内部的物质组成提供了大量可靠的实验数据.本文总结了在过去 20 年高温高压矿物学实验在弹性和波速测量中取得的技术进步和所获得的新的科学认识,对未来的实验研究进

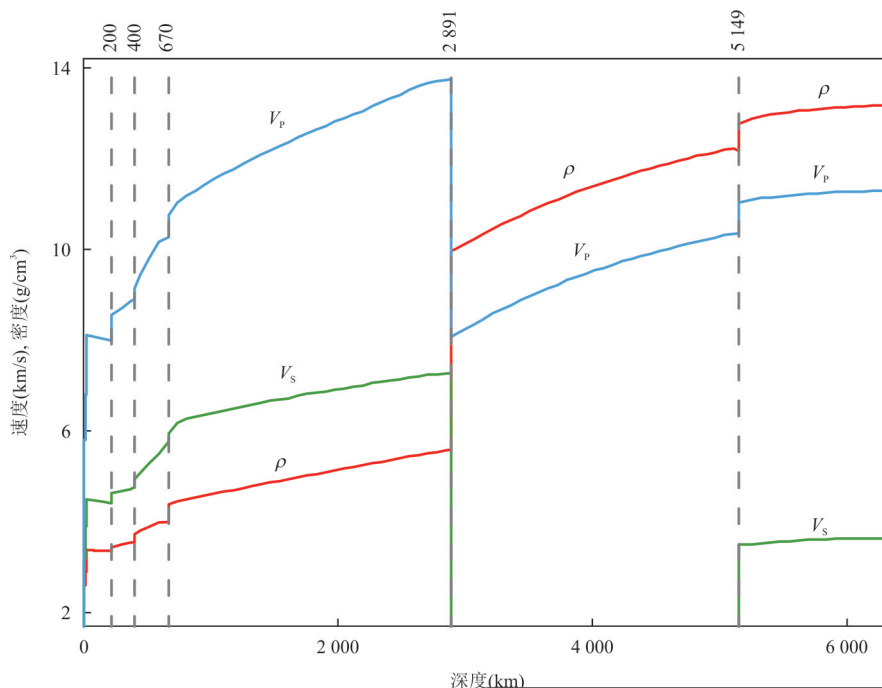


图 1 地球内部一维地震波速度图像(PREM)(据 Dziewonski and Anderson, 1981)

Fig.1 1D seismic velocity profiles of the Earth's interior (PREM) (from Dziewonski and Anderson, 1981)

行了展望,针对可能遇到的问题提出了潜在应对策略.

## 1 实验矿物物理弹性和波速测量的发展现状与趋势

地球内部处于极端的高压,核幔边界的压强已达到 136 GPa,内外核边界的压强高达 330 GPa (Duffy, 2008a). 用于波速和弹性测量的高压矿物样品尺寸仅有几十或者 100~200  $\mu\text{m}$ ,即使是大腔体压机,其样品尺寸也不超过 1 mm (Duffy, 2008b). 无论是利用激光还是非弹 X 光的波速测量技术,对微米量级的矿物样品进行高温高压波速和弹性性质的实验测量,信噪比都较低,致使测量矿物的波速和弹性性质一直都是高温高压实验研究的难点. 在弹性和波速测量技术中,基于大腔体压机的同步辐射超声波波速测量技术,基于金刚石对顶砧的布里渊散射、激光脉冲、X 光高能非弹散射,是高温高压条件下测定地幔和地核矿物弹性、波速的主要技术方法. 目前利用这些技术手段,已获得了大部分地幔和地核矿物的波速和弹性数据,为了解地球深部物质组成和性质提供了重要的视角和窗口 (Marquardt and Thomas, 2020; Mao *et al.*, 2021).

### 1.1 大腔体压机的同步辐射超声波波速测量

与同步辐射相结合的大腔体压机超声波波速测量技术是高温高压下测量矿物弹性和波速的重要方法,在过去 30 年得到了广泛的应用. 大腔体压机为超声波波速测量实验提供精确的压力和温度,同步辐射 X 光技术可以在高温高压原位监测样品的长度与密度变化,从而可以实现压力、温度、密度、波速的同步测量,同时得到矿物样品的压力和温度弹性和波速数据 (Li and Liebermann, 2014; 周春银和金振民, 2014). 在这些实验中,大腔体压机的压力标定主要应用多种物质 (Bi, ZnTe, ZnS, GaP 等) 的压致相变引起的电阻率突变来标定腔体内的实际产生压力,进而通过拟合得到腔体压力与压机油压的关系;进一步通过高温下矿物相变 ( $\text{SiO}_2$  柯石英到斯石英、 $\text{MgSiO}_3$  秋本石到布里奇曼石等) 来确定高温下的压力产生. 实验室内的的大腔体压机的压力产生不能实现适时原位检测,通过油压反推的压力存在一定误差,高温下压力的变化也存在波动. 同步辐射线站的大腔体压机可以实现适时的原位高温下的精确压力标定,克服了实验室内大腔体

压机根据物质压致相变引起的电阻率突变来标定压力产生较大误差的缺点,但目前不同标压物质 (Au、MgO 等) 的状态方程确定的压力以及相应精度还存在很大差异性,需要建立统一、精确的压力标定方法. 另外,样品的高温高压烧结品质直接影响超声波弹性与波速数据的质量,高温高压合成出致密、无空隙的多晶样品是超声波干涉法能准确测量矿物弹性和波速的先决条件 (Li and Liebermann, 2014).

受限制于大腔体压机的高压产生技术难点,超声波波速测量的温压极限大部分只能达到地幔过渡带中部 550 km 的温压条件 ( $\sim 20$  GPa 与  $\sim 1700$  K) (Li *et al.*, 1998; Darling *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005; Gwanmesia *et al.*, 2014). 因此,该项技术多被用于在高温高压下原位测量上地幔和过渡带主要构成矿物的波速和弹性,尤其是橄榄石及其同质异象体瓦兹利石和林伍德石、不同组分的辉石以及石榴子石等重要地幔矿物 (图 3) (Li *et al.*, 1998; Darling *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005; Irifune *et al.*, 2008; Gwanmesia *et al.*, 2014). 利用这些原位的高温高压弹性和波速结果,明确了上地幔橄榄石含量大约在 50% (Li and Liebermann, 2007); 上地幔和过渡带成分基本符合地幔岩模型 (Li and Liebermann, 2007; Irifune *et al.*, 2008); 发现超硅石榴石高压下波速随温度增长的非线性降低效应 (Irifune *et al.*, 2008). 同时,实验结果也被应用于制约过渡带 410 km 和 660 km 不连续面速度跳变,揭示上地幔和地幔过渡带的物质组成与性质.

由于大腔体压机的温压产生极限往往低于下地幔顶部 700 km 的温压条件 (25 GPa 与 2000 K), 对 (Mg, Fe) ( $\text{Al, Si}$ )  $\text{O}_3$  布里奇曼石、 $\text{SiO}_2$  斯石英、 $\text{CaSiO}_3$  毛钙硅石等下地幔主要矿物的多晶烧结体高压合成较难,对其进行超声波波速测量研究就更少,因此同时高温高压条件下测量下地幔矿物的弹性与波速一直极具挑战,尤其立方结构的  $\text{CaSiO}_3$  的毛钙硅石不可卸压,只能在高温高压的原位条件下进行测试 (图 3).

Gréaux *et al.* (2016) 系统的研究了具有不同 Al 含量的  $\text{SiO}_2$  斯石英在 0~17 GPa 与 300~1700 K 的弹性和波速,发现 Al 的掺杂降低  $\text{SiO}_2$  斯石英的波速,可以帮助解释玄武质洋壳在地幔过渡带底部的波速差异性 (图 3). 美国纽约州立大学石溪分校的 Li and Zhang (2005) 测量了  $\text{MgSiO}_3$  布里奇曼石在

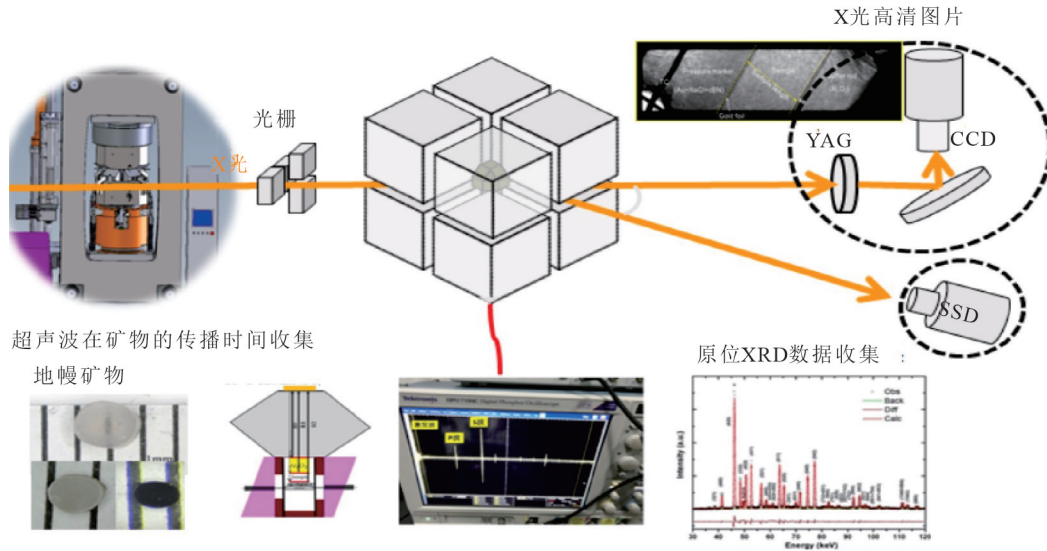


图2 基于大腔体压机的同步辐射超声波波速测量方法  
Fig 2 Ultrasonic measurements in large-volume press

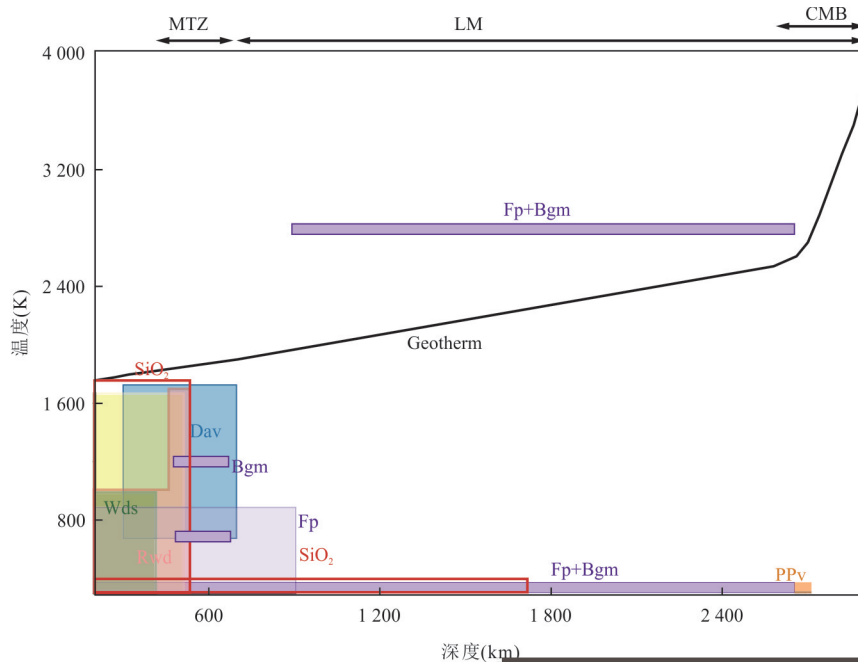


图3 地幔过渡带和下地幔主要构成矿物弹性和波速研究的温压范围

Fig.3 Experimental pressure and temperature range for the elasticity and sound velocity of minerals in the transition zone and lower mantle  
绿色 Wds. 瓦兹力石; 粉色 Rwd. 林伍德石; 蓝色 Dav. 毛钙硅石; 黄色 Maj. 超硅石榴石; 紫色 Bgm. 布里奇曼石; 紫色 Fp. 铁方镁石; 橙色 PPv. 后钙钛矿; 黑色实线. 地幔温度线

高压常温下的弹性与波速数据,德国拜罗伊特大学 Chantel *et al.* (2012)在高达 25 GPa 与 1 200 K 条件下测量 (Mg, Fe)SiO<sub>3</sub> 布里奇曼石的弹性与波速,发现地幔岩构建的下地幔波速模型与全球地震模型 (PREM) 基本符合,但高温 700 K 与 1 200 K 下的数据仅有 3 个点,布里奇曼石的高温弹性数据误差较大,需要进一步在下地幔更宽广的温压范围进行测

量来约束其高温弹性参数,另外下地幔的布里奇曼石富含一定量铝 (Al), Al 的掺杂如何影响布里奇曼石的弹性与波速也需要进一步研究.

近年来随着大腔体压机超高压高温技术的发展,超声波波速测量的压力和温度大幅提升到下地幔的顶部 750 km 的压力和温度 (~27 GPa, ~1 873 K) (Li *et al.*, 1998; Higo *et al.*, 2018). 最近,

Gréaux *et al.* (2019)利用大腔体压机的超高压高温技术与同步辐射X光技术,在高达23 GPa和1 700 K的地幔过渡带底部与下地幔顶部的条件下对多晶 $\text{CaSiO}_3$ 毛钙硅石进行了原位波速测量,发现毛钙硅石的剪切模量比理论预测的要低26%,因此富含毛钙硅石的玄武质洋壳在地幔过渡带底部660 km到下地幔顶部770 km的波速会比全球地震模型(PREM)的波速低很多,与日本、北美板块等区域660~700 km深度观测到的低波速异常一致(Gréaux *et al.*, 2019).随后英国伦敦大学Thomson *et al.* (2019)采用同样的波速测量方法,在高达12 GPa和1 250 K的条件下研究 $\text{CaSiO}_3$ 以及(Ca, Ti) $\text{SiO}_3$ 毛钙硅石的弹性与波速,发现Ti的掺杂将 $\text{CaSiO}_3$ 毛钙硅石从四方相转变到立方的温度提高了近800 K,且引起较大波速异常变化(Gréaux *et al.*, 2019; Thomson *et al.*, 2019),进一步利用热力学计算提出含毛钙硅石的玄武质洋壳的在下地幔的富集可以解释核幔边界上方的大型横波低速带.但Thomson *et al.* (2019)对毛钙硅石的波速测量的温压范围相对于下地幔的深度依然非常有限,需要在更宽广的地幔过渡带温压条件下对毛钙硅石进行波速测量,另外Al含量和OH含量如何影响毛钙硅石的波速也是未知的,这些问题的解答将进一步帮助解决毛钙硅石弹性的理论计算与实验结果之间存在的较大差异,揭示地幔过渡带底部与下地幔的波速结构与物质组成.

水和碳是地球内部重要的挥发分.地幔含水和含碳矿物的弹性与波速研究可以帮助了解水等挥发分对板块俯冲行为的影响.受水的影响,大腔体压机上合成适合超声波波速测量的多晶含水矿物烧结体非常具有挑战性,也一直是超声波测量技术的最大难点之一.近期美国纽约州立大学石溪分校的Cai *et al.* (2021)与日本爱媛大学的Xu *et al.* (2020a)分别成功合成出上地幔的含水相Phase A与下地幔的含Al的Phase D含水相多晶烧结体,并分别在上地幔与地幔过渡带的高温高压条件下测量上述2个含水相矿物的弹性和波速数据.Cai *et al.* (2021)研究发现Phase A含水相生成会增加冷俯冲板片与地幔岩的波速差,结合地震波速度结构,可用于定量分析计算俯冲板块的水含量和水分分布情况;Xu *et al.* (2020a)发现含Al的Phase D相对于地幔过渡带主要矿物譬如含水林伍德石具有较高的波速,提出富含Al的Phase D的俯冲板块在下

地幔顶部的堆积,可以帮助解释地震学观测到的横波波速差异性.目前对含水矿物,尤其是高温下的弹性和波速测量非常少,也比较具有挑战性,需要进一步开展地幔不同深度的含水矿物的弹性和波速的原位高温高压测量,阐明水对地幔波速结构以及对板块俯冲的影响.

熔体是地球内部的重要组成部分,对地球内部的波速有重要的影响,但熔体的声波波速和弹性测量一直也是矿物岩石学物性测量的难点(Jing *et al.*, 2020),近期美国和日本研究小组先后利用大腔体压机的同步辐射超声波测量技术对硅酸盐熔体与铁-轻元素合金展开原位高温高压弹性与波速研究(Jing *et al.*, 2014; Kuwabara *et al.*, 2016; Nishida *et al.*, 2016, 2020; Terasaki *et al.*, 2019; Jing *et al.*, 2020).美国凯斯西储大学Xu *et al.* (2018)与南方科技大学Jing *et al.* (2020)在上地幔温压条件下对 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ 硅酸盐与 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 碳酸盐等成分的熔体开展声波波速和密度的研究,揭示了上地幔的碳含量(Xu *et al.*, 2020b),发现 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ 等硅酸盐熔体可以解释上地幔观测到的波速衰减(Xu *et al.*, 2018; Jing *et al.*, 2020).对不同成分的Fe-S、Fe-Ni-S以及Fe-Ni-Si等合金展开在原位高压高温下的密度与纵波波速,分别约束了水星、月球与火星核的轻元素成分(Jing *et al.*, 2014; Kuwabara *et al.*, 2016; Nishida *et al.*, 2016, 2020; Terasaki *et al.*, 2019),为了进一步约束类地行星核的物质组成,需要进一步对更多成分的铁-轻元素合金展开在类地行星核不同压力范围内的波速和密度研究.

## 1.2 基于金刚石压砧的弹性和波速测量

与大腔体压机相比,金刚石压砧通过减小所配备的金刚石台面直径,可大幅度提升实验压力至地核深部(Duffy *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2018).与电阻丝加热或激光加热技术的结合,使得实验温度能覆盖整个地幔温度(Prakapenka *et al.*, 2008).在金刚石压砧实验中,压力的标定主要依赖压标物质的状态方程,如红宝石荧光,Pt、Au、NaCl、KCl等金属、氯化物以及惰性气体.但不同时期、不同研究组对同一压标物质给出的状态方程有一定的差异,而实验采用不同种类压标物质进行定压时也存在标定压力的差别,这都增加了金刚石压砧实验中压力标定不准确.与此外,绝大多数金刚石压砧实验使用传压介质提供准静水压状态,但在高压下压砧样

品腔内会不断积累应力,使样品腔中的差应力不断增大——这也会对金刚石压砧实验压力标定带来影响。目前,Fei *et al.* (2021)将 Pt、Au、Ne、NaCl 以及红宝石荧光进行了压力标准的统一,提供了一个内部自洽的压力标定方式;还有学者通过将 Pt、Au、NaCl、MgO 和 Mo 混合,置入同一个金刚石压砧中,使不同压标物质处于相似的应力状态进行状态方程的测量,尽量减小了不同压砧中应力状态的不同对确定的压标物质状态方程的影响。在外加热金刚石压砧实验中,温度的标定主要依赖不同类型的电阻丝,温度标定误差较小。但在激光加热实验中,由于激光光斑存在一定的温度梯度( $\sim 10^4$  K/mm),实验温度误差在 5%~10%。通过将聚焦高斯激光束重塑为平顶激光束能够更大程度地使激光能量均匀分布在样品上,由此降低样品上的温度梯度(Prakapenka *et al.*, 2008)。

金刚石压砧一个重要应用是与布里渊散射结合,在高温高压下测量矿物的弹性性质和波速(Polian, 2003)。布里渊散射主要是利用探测激光通过样品时,与声学声子和磁振子等相互作用而发生非弹性散射,通过测量激光与散射光之间的频率偏移可以直接算出声波的声速(图 3)。布里渊散射所采用的样品可以是单晶,也可以是多晶,但要求样品是透明的或者半透明——部分高铁含量的样品则无法采用这一技术获得弹性性质和波速信息。对于单晶样品,可以通过不同的传播方向上的声速,利用 Christoffel 方程和高温高压下的密度信息来约束单晶样品的全部弹性模量,进而得到样品的波速各向异性(Every, 1980)。矿物在地幔相应温压条件下单晶弹性模量的获得,对解释地幔波速各向异性,明确地幔变形机制和历史具有重要意义。例如, Duffy *et al.* (1995)就利用高压下测量的橄榄石单晶模量估算了上地幔橄榄石的含量;Sinogeikin *et al.* (2003)通过获得的瓦兹利石和林伍德石单晶弹性模量探讨了 520 km 不连续面的形成机制;高温高压下橄榄石单晶模量的模量还被用于探讨亚稳态橄榄石在俯冲板片中的存在性和过渡带深震成因,以及上地幔橄榄石分布的横向不均一性(Mao *et al.*, 2015; Zhang and Bass, 2016);水对橄榄石及其同质异象体弹性性质的获得被用于揭示水在上地幔和过渡带的分布以及随深度的变化趋势(Wang *et al.*, 2006; Mao *et al.*, 2008, 2011, 2012a; Buchen *et al.*, 2018b; Schulze *et al.*, 2018);铁在下地幔铁方

镁石中的自旋转变也被发现对弹性性质有较大影响(图 3)(Crowhurst *et al.*, 2008; Marquardt *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2016)。

但由于大部分地幔矿物结构对称性低,布里渊散射信号强度随压力升高急剧下降。在某一温度和压力条件下确定矿物的单晶弹性模量需要对单晶样品进行多达几十个晶格取向的波速测量。特别是金刚石强而宽的横波信号会在 20~25 GPa 左右与矿物微弱的纵波波速重合,致使在过渡带底部和下地幔温压条件下获得地幔矿物的单晶弹性模量十分困难。目前,具有代表性的工作是 Kurnosov *et al.* (2017)采用金刚石对顶砧和布里渊散射测量了单晶(Fe-Al)—布里奇曼石在室温下 0~40 GPa 的弹性性质,提出下地幔布里奇曼石中  $\text{Fe}^{3+}$  的含量应该随深度增加而降低。但该项研究压力还局限于下地幔顶部,实验数据受到质疑(Lin *et al.*, 2018)。另外,布里渊散射还要求样品至少是半透明,一般的 YAG 激光无法对其进行加热,只能依赖以电阻丝加热为主导的外加热金刚石压砧进行高压下高温实验。而外加热金刚石压砧与布里渊的结合,高压下温度还局限在 1 000 K 以下(Mao *et al.*, 2015; Duan *et al.*, 2018; Fan *et al.*, 2019)。新墨西哥州立大学的 Zhang and Bass (2016)将  $\text{CO}_2$  激光加热与金刚石压砧和布里渊散射结合,将高压下将单晶实验温度提升到 1 300 K——但仍低于地幔温度。这些都极大地限制了布里渊散射在地幔矿物弹性性质研究中高温高压下的原位实验应用。

另一条研究思路是对多晶样品进行布里渊散射波速测量。虽然丢失了一些弹性张量和弹性各向异性的信息,且受样品晶格取向以及颗粒尺寸的影响,实验结果准确性会受到一定影响。但多晶样品的使用可以极大减少高温下波速测量的数量,提高实验效率。前人数次大幅提高金刚石对顶砧和布里渊散射在横波波速和弹性性质测量的温度和压强上限,将布里奇曼石波速测量的压力提高到 120 GPa,温度高达 2 700 K(图 3)(Murakami *et al.*, 2007a, 2007b, 2012)。由此提出下地幔是以布里奇曼石成分为主导的区域,但目前这一结论存在较大争议(Murakami *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015)。通过对比布里奇曼石和纯镁端元硅酸盐后钙钛矿的波速,发现布里奇曼石至后钙钛矿相变只能造成 1% 的速度跳变,远小于地震学观测到的 2%~3% 的速度突变值以及理论计算预测值(Murakami *et*

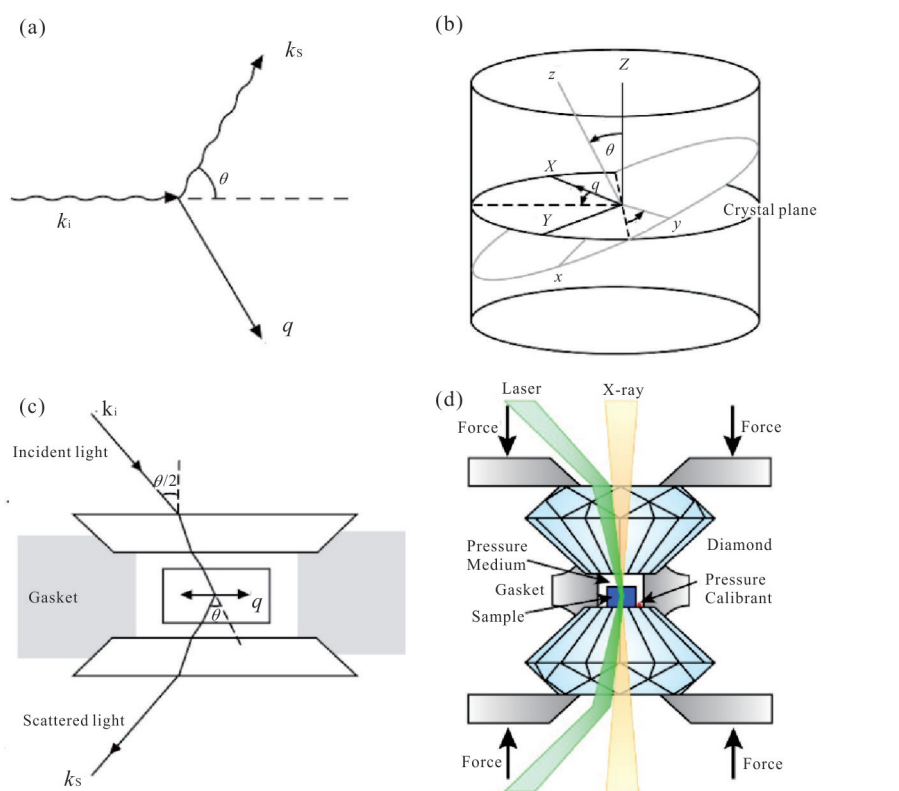


图 4 金刚石压砧和布里渊散射

Fig.4 Diamond anvil cells and Brillouin scattering

a. 声子散射; b. 布里渊散射中的单晶弹性模量测量; c, d. 金刚石压砧中的布里渊散射

*al.*, 2007a, 2007b). 那么 D'' 不连续面的形成是否与布里奇曼石至后钙钛矿相变相关? 是不是因为布里奇曼石和后钙钛矿相在下地幔底部都存在强烈的波速各向异性才导致了较大速度跳变的 D'' 不连续面形成 (Murakami *et al.*, 2007a)? 此外, 目前缺乏对布里奇曼石和后钙钛矿相在下地幔深部相应温压条件下单晶弹性模量的实验值, 仍无法回答这一问题. 更为重要的是, 由于金刚石横波信号在超过 20~25 GPa 之后对矿物纵波的影响, 上述研究都只获得了布里奇曼石和后钙钛矿的横波波速. 对纵波波速的确定还依赖与 X 光衍射结果的结合. 但 X 光衍射实验得到的状态方程里众多热力学参数彼此依赖, 无法独立确定, 导致确定纵波波速必须的体积模量在 X 光衍射实验中存在很大的不确定性 (Murakami *et al.*, 2007a, 2007b, 2012). 至今在实验上仍不清楚布里奇曼石到后钙钛矿相变对纵波波速的影响.

近年来德州大学奥斯汀分校的 Jung-Fu Lin 教授团队致力于将金刚石对顶砧、布里渊散射和激光脉冲法相结合, 弥补了布里渊散射在高压下由于受

到金刚石纵波信号干扰, 无法完整解析出下地幔矿物单晶弹性模量的缺憾, 为在下地幔深部压力下测定矿物的单晶弹性模量, 对解释下地幔深部波速各向异性的成因提供了新的研究途径 (Fu *et al.*, 2017, 2018, 2019; Zhang *et al.*, 2021). 例如, Fu *et al.* (2017) 利用金刚石对顶砧与布里渊散射先是在下地幔压力下获得了铁方镁石在不同晶向的横波波速, 再由激光脉冲法获得了所对应晶向的纵波波速. 两相结合解析出了铁方镁石在下地幔压力下的单晶弹性模量, 明确了铁自旋转变对铁方镁石单晶弹性模量的影响, 解决了铁自旋转变是否对弹性性质会造成影响的争论 (Crowhurst *et al.*, 2008; Marquardt *et al.*, 2009; Antonangeli *et al.*, 2011; Fu *et al.*, 2017). Zhang *et al.* (2021) 采用相同的实验设置, 首次在实验上确定了斯石英相变至 CaCl<sub>2</sub> 相对对波速的影响. 特别发现相变会带来纵波波速明显的软化, 而对横波波速影响很小——与此前的理论计算差别很大 (Yang and Wu, 2014; Buchen *et al.*, 2018a; Zhang *et al.*, 2021). 因此, 金刚石对顶砧、布里渊散射和激光脉冲法的结合为解决在下地

幔深部矿物波速甚至是单晶弹性模量带来了曙光。

此外,金刚石压砧还与多种 X 光散射技术结合测量地幔和地核矿物的弹性性质和波速. 金刚石压砧与核共振非弹性 X 光散射的结合先是被应用于测量铁以及铁-轻元素合金的德拜速度. 将测量的德拜速度和高温高压下的状态方程相结合,可以解析出铁以及铁-轻元素合金纵波和横波波速(Lin *et al.*, 2005). Lin *et al.* (2005)发现温度的升高会造成铁的波速明显降低,并不符合 Birch 定律里面预测的温度变化并不改变密度和波速的线性关系这一结论;通过对比 Fe-H、Fe-C、Fe-P 等铁-轻元素合金与铁的波速,被用于限定地球内核轻元素含量的最大值(Shibazaki *et al.*, 2012; Takahashi *et al.*, 2019; Lai *et al.*, 2020). 此后,这一技术也被用于测量铁方镁石的单晶弹性性质,并发现富铁铁方镁石具有极低的波速(Wicks *et al.*, 2010). 其在核幔边界的富集,可能是核幔边界超低速带的形成原因(Wicks *et al.*, 2010). 而金刚石压砧与高能 X 光非弹散射的结合能够直接获得铁以及铁-轻元素合金的纵波波速,比核共振非弹性 X 光散射更为直接地制约波速,获得了包括 Fe-Si、Fe-S、Fe-O、Fe-H

等合金的纵波波速(Badro *et al.*, 2007). 在高压常温下,所有铁-轻元素合金的纵波波速都与密度线性相关. 该项技术还与外加热金刚石压砧结合,获得了 300~700 K、到 105 GPa 铁的纵波波速,并发现在更宽的压力范围下,铁的纵波波速实际与密度非线性相关,并证实此前研究指出的 Birch 定律中密度与波速的线性关系并不适用于预测铁在高温高压下的波速(Mao *et al.*, 2012a). Sakairi *et al.* (2018)进一步拓展了金刚石压砧在高能 X 光非弹散射测量 Fe-轻元素合金的实验温度. 他们在 45~84 GPa 和 300~1 800 K 温压范围测量了 Fe-6%Si 的波速,获得了纵波波速和密度、温度的关系(Sakairi *et al.*, 2018). 但这些研究的实验温度还远远低于内核,压力也仍在下地幔范围,将实验结果外推至内核温压条件存在极大的不确定性.

### 1.3 冲击波技术在波速测量中的应用

冲击压缩能在瞬间(ns 至  $\mu$ s)使物质产生极高的温度和压强. 相对于大腔体压机和金刚石压砧而言,冲击压缩能较轻松地产生涵盖整个地球深部甚至地核的温压环境,并且能够在较大尺寸(cm 级)的样品内产生超高温高压环境. 因此,在深部地球、巨

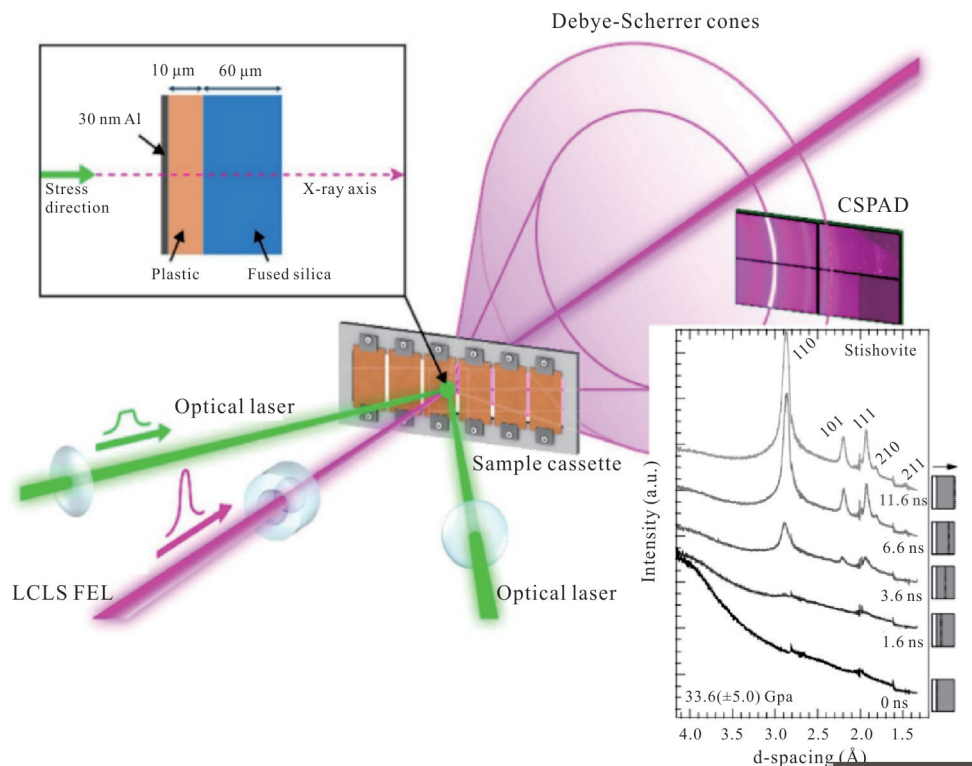


图 5 激光冲击高压加载与 X 射线自由电子激光结合原位获取高压物质结构示意图

Fig.5 Combination of laser shock compression and X-ray free-electron laser diagnostics

据 Sandbeg *et al.*(2015)



行星以及系外行星物质波速的实验研究中占据重要地位。其中,利用光分析方法和反向碰撞方法测量卸载波在一定厚度物质受到压缩状态下的传播时间便可直接获得波速。比如,加州理工大学Duffy和Ahrens等很早就利用二级轻气炮在冲击高温高压下对金属和多种矿物的波速进行了测量。武汉理工大学的黄海军教授团队利用轻气炮装置,通过冲击波测定不同种类的铁-轻元素合金波速(Huang *et al.*, 2011, 2019; Liu *et al.*, 2020)。尤其是他们创新型的根据测量的铁-轻元素三元体系波速,排除了氧在外核存在的可能性,为明确地核轻元素组成做出了重要贡献(Huang *et al.*, 2011)。利用冲击压缩技术,国内外多位学者研究了硅酸盐和氧化物等矿物在地幔高温高压条件下相变、自旋转变和熔化等物理变化以及其对波速的影响。相比于金刚石压腔中使用布里渊散射技术测量弹性性质时需要样品具有透明性,冲击波压缩下可以测量透明或不透明矿物的波速。

冲击压缩实验目前也存在一些需要解决的问题。其一是较难准确测量Hugoniot状态下样品的温度。对于透明材料,可采用高时间分辨的光学高温计测量冲击波温度,然而对于半透或不透明材料,不能直接观察到来自样品内部冲击波阵面的光辐射,从而导致辐射高温计对温度的测量变得困难。为了提高时间分辨,高温计一般采用非连续辐射光谱,这也产生了较大的测量误差。最近,有几位学者改进了冲击下样品的装配方法,采用准连续光谱高温计获得了样品与窗口界面温度,并通过对界面间热传导的处理,更加精确地获得了Fe等不透明金属样品在冲击下的温度以及高压熔化线,揭示了内外核边界的温度和地核温度剖面。其二是在冲击压缩下较难获得物质的原位结构信息。这是因为在非常短的冲击压缩时间内,一般的X射线或同步辐射产生的X射线亮度和光通量不够。长久以来,对物质在经历冲击高温高压的瞬间是否发生结构相变主要通过观察宏观物性或粒子速度的变化来推测,对于发生什么样的结构相变是较难获取的。近年来,以罗切斯特大学激光能量实验室、美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室、美国SLAC国家加速器实验室以及中国工程物理研究院等为代表,发展出激光驱动动态压缩与X射线衍射或X射线自由电子激光结合的技术(Duffy and Smith, 2019; Gorman *et al.*, 2020; 李牧等, 2022)。该项新技术不仅能轻松实现超过1 000

GPa的压力,还能同时明确物质在冲击加载瞬间的结构信息(Duffy and Smith, 2019)。Wicks *et al.* (2018)就在高至1 300 GPa压力下测量了不同Si含量Fe-Si合金的波速和结构信息,发现含有15% Si的Fe-Si合金在地球内核主要是体心立方结构,而只含有8% Si的Fe-Si合金则是六角密排晶格结构。这也是首次在覆盖了整个地球温压条件下,确定了铁-轻元素合金的密度、结构和弹性性质。有学者利用美国NIF激光器获得了Fe在1 000 GPa以及10 000 K温度和压力下的结构和熔化温度,揭示了类地巨行星核的温度和演化规律。激光驱动动态压缩技术还被用于在“超级地球”温压条件下(超越几个地心压力和温度),研究包括MgO、金刚石、SiO<sub>2</sub>、液态MgSiO<sub>3</sub>等行星基础构成物质的热力学状态方程和弹性性质(Coppari *et al.*, 2013; Smith *et al.*, 2014; Tracy *et al.*, 2018; Fei *et al.*, 2021)。该技术将在高压行星科学的研究中发挥更大的作用。

## 2 高温高压下实验测量弹性和波速的关键科学问题与挑战

### 2.1 关键科学问题

现阶段已经积累了大量地幔和地核矿物波速和弹性性质在高温高压下的实验数据,这些数据已经在限定核幔物质组成,明确地幔物质横向分布不均一性,认识地幔波速各向异性形成机制,挥发分在地球内部输运等众多问题上发挥了重要作用。但仍有很多重要的科学问题未获得很好的认识。这些科学问题包括:

**2.1.1 地幔重要挥发分的存储和分布** 水和碳是地球内部两类重要的挥发分,尤其是近年来的地质学通过研究金刚石包裹体,发现从上地幔到下地幔顶部,在不同区域均存在水和碳。水除了可以以羟基形式存在于矿物,还可以以水分子、高压冰、分子氢,以及铁-氢化合物存在于地球深内部。由于碳在硅酸盐中的溶解度极低,主要由碳酸盐、金刚石以及碳化物形式存在于地球内部。那么关键问题包括:水和碳在地球内部存在于哪些区域和深度?其空间分布是否具有一定的规律?地球表面和内部是如何对这些挥发分进行交换?这些挥发分是否是在地球形成初期就存在于地球并如何演化到今天的状态?含水熔体的地震学信号是什么样子?超离子

态的铁—氢化合物有什么样的速度和密度特性?测定广义上的水,包括矿物中结构羟基、含水熔体、不同形式的高压冰、铁—氢化合物对地幔速度结构的影响,明确不同含碳物质的波速和密度,对厘清水和碳在地球深内部赋存形式、输运过程、含量多少至关重要。

**2.1.2 地幔不同深度波速各向异性的成因** 地幔波速各向异性程度随着深度的增加逐渐降低,而在核幔边界又达到一个极值。那么,不同深度波速各向异性的成因是什么?波速各向异性与地幔变形历史有什么样的关系?从波速各向异性如何认识地幔的演化历史?

**2.1.3 下地幔的物质组成与性质** 下地幔是地球深部最广阔、地震波结构最复杂的区域之一,其物质组成与性质一直是有争议的。在下地幔的 800、900~1 200、1 800 km 均存在波速异常的地球物理现象(Kennett *et al.*, 1998; van der Hilst and Karason, 1999; Fukao and Obayashi, 2013),如何解释这些波速异常的成因?如何解决下地幔的物质组成与性质的争议?

**2.1.4 核幔边界 D''层、ULVZ、LLSVPs 的形成机制** D''层作为地幔中最后一个速度不连续面,形成机制仍存在争议。核幔边界还存在形成机制仍有争议的超低速带(ULVZ)和大剪切低波速省(LLSVPs)。在核幔边界仍不明确科学问题包括: D''层是否是由布里奇曼石到后钙钛矿相相变造成的? D''层在全球分布不均一性的成因? D''层在不同区域深度变化的形成机制? ULVZ 和 LLSVPs 的形成机制是什么?核幔边界物质和温度分布的不均一性与 ULVZ 和 LLSVPs 的关系?

**2.1.5 地核物质组成** 地核轻元素种类目前主要集中在 Si、S、O、C、H 这 5 种。但是对于地核的物质组成,还存在一些问题:地核是由哪几种轻元素构成?轻元素的含量是多少?内外核轻元素的分布?内外核边界轻元素分布与地核东西半球不均一性的相关关系?

**2.1.6 不同种类行星的内部结构和物质组成** 太阳系各个行星和卫星与地球相比,即使是类地行星,既有共同点,又大不相同。这些独具特色的行星,也包括系外行星,有诸多问题等着我们去解答:这些行星的物质组成是什么?内部圈层结构如何?以冰、氨、甲烷、氢、氦为主体的一些海洋和气态行星和卫星,表面冰层以及下面的海洋层厚度是多

少?与更深部的硅酸盐岩石层如何相互作用?

## 2.2 主要研究方向和应对策略

针对上述关键科学问题,未来高温高压实验在矿物弹性和波速研究的主要方向包括:

**2.2.1 在地幔相应温度和压力下原位测量含水/碳等矿物的弹性和波速** 在地幔相应的温度和压力下测量矿物的弹性和波速,尤其是下地幔矿物,进一步揭示地幔的物质组成与性质;进一步测定不同碳酸盐、Fe-C 化合物等物质的弹性性质和波速,并与地震学观测对比,是寻找地幔富水/碳区域,识别水和碳存储区的重要方法。但目前大多数相关实验研究仅在常温高压或者常压高温下开展,或者高温高压原位实验温度远低于地幔,将实验温度进行外推到地幔温度并由此进行地幔水/碳含量的判定可能带来较大的误差。因此,改进现有的高温高压弹性和波速测量实验技术,对于大腔体压机使用超硬碳化钨压砧与烧结金刚石做二级压砧,能大幅度提升实验压力至下地幔深部 900 km 以下(压力  $\geq 35$  GPa, 温度  $\geq 2 000$  K);将激光加热与外加热金刚石压砧技术结合,不仅能提升弹性和波速测量的实验温度,还能使加热更加均匀,高温实验数据更加可靠。再者,综合利用动、静压技术不同的特点,比如利用金刚石静压技术在微观结构中的测量优势以及动压在宏观物性的测量优势可以更加准确地获得矿物在地幔高温高压下的结构与波速信息。在地幔温压相应条件下原位测量矿物以及含水/碳矿物的弹性和波速,将为揭示地幔,尤其是下地幔的物质组成和性质提供新的信息,也势必为认识这些重要挥发分在地幔的存储状态、含量、分布和迁移带来新的突破。

**2.2.2 核幔物质单晶弹性的确定与流变学性质的结合** 目前,均认为地震学在地幔和内核观测到的波速各向异性是由主要构成矿物在高温高压下的晶格择优取向所致。明确地幔和内核波速各向异性的形成机制,需要将矿物在地幔和地核相应温度和压力下的单晶弹性模量与这些物质的流变学特征相结合。如前所述,不同实验方法在矿物弹性和波速的测量中存在不同的缺陷,单一实验手段无法在高温高压下完全确定矿物的单晶弹性模量。因此,联合多种实验手段开展地幔,甚至地核温压条件下矿物单晶弹性性质的实验测量,并结合流变学实验结果,是解决核、幔波速各向异性成因,明确其形成机制和演化历史的关键。

### 2.2.3 核幔边界温压条件下主要构成矿物的弹性和波速

核幔边界是地球上最为复杂的区域之一。无论是D"不连续面、ULVZ还是LLSPVs,其深度、速度结构和分布均存在强烈的不均一性。理解D"不连续面、ULVZ和LLSPVs的形成机制,需要在核幔边界相应温度和压力下系统研究成分变化对核幔边界主要构成矿物的弹性性质和波速的影响。成分变化不仅包括Fe、Al、Ca等地球内部主要元素,还包括H、C等挥发分。由于核幔边界的超高温度和压力,即使是对于多晶样品,弹性性质和波速的实验测量都极具挑战。尤其是对布里奇曼石单晶弹性性质的高温高压研究,还将对核幔边界波速各向异性提供关键制约。

**2.2.4 地核的内部物质组成** 针对地核铁—轻元素合金波速的实验测量已经有很多,但是大部分研究主要针对简单的铁—轻元素二元体系,而已知地核含有不止一种轻元素。复杂体系,如铁—轻元素三元体系的波速信息极度缺乏。大部分实验的温度和压力也远低于地核实际温压条件。随着我国神光装置的运行和激光驱动动态压缩技术的快速发展,将为在地核温压条件下实验测量复杂成分的铁—轻元素合金波速,为最终明确地核物质成分带来契机。

**2.2.5 行星内部构成物质的弹性和波速** 深空探测是我国战略基础研究之一,以明确行星的结构和物质组成,认识太阳系各类天体和太阳系起源为总体目标。通过在实验室模拟行星内部所处的极端高温高压条件,测量行星构成物质的弹性和波速,将为破解深空探测获得的宝贵资料提供重要制约。除了与地球类似的类地行星主要由硅酸盐矿物组成,气体行星、卫星以及系外海洋行星上还存在大量的水(冰)、氨、甲烷、氢和氦等物质。其中一些物质还处于远超地心温度和压力的状态。采用激光驱动动态压缩技术测量这些物质在几个地心压力和温度下的波速—深度关系,将为认识这些星体的结构、物质组成和形成演化机制,探查太阳系各类天体和太阳系起源开创新的篇章。

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约稿。

## References

Abramson, E.H., Brown, J.M., Slutsky, L.J., et al., 1997. The Elastic Constants of San Carlos Olivine to 17 GPa. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 102:12253—

12263.

- Antonangeli, D., Siebert, J., Aracne, C. M., et al., 2011. Spin Crossover in Ferroperricite at High Pressure: A Seismologically Transparent Transition? *Science*, 331(6013): 64—67. <https://doi.org/10.1126/science.1198429>
- Badro, J., Fiquet, G., Guyot, F., et al., 2007. Effect of Light Elements on the Sound Velocities in Solid Iron: Implications for the Composition of Earth's Core. *Earth and Planetary Science Letters*, 254(1/2): 233—238. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.11.025>
- Buchen, J., Marquardt, H., Schulze, K., et al., 2018a. Equation of State of Polycrystalline Stishovite across the Tetragonal-Orthorhombic Phase Transition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9): 7347—7360. <https://doi.org/10.1029/2018jb015835>
- Buchen, J., Marquardt, H., Speziale, S., et al., 2018b. High-Pressure Single-Crystal Elasticity of Wadsleyite and the Seismic Signature of Water in the Shallow Transition Zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 498: 77—87. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.06.027>
- Cai, N.A., Qi, X.T., Chen, T., et al., 2021. Enhanced Visibility of Subduction Slabs by the Formation of Dense Hydrated Phase A. *Geophysical Research Letters*, 48:15—26. <https://doi.org/10.1029/2021GL095487>
- Chantel, J., Frost, D. J., McCammon, C. A., et al., 2012. Acoustic Velocities of Pure and Iron-Bearing Magnesium Silicate Perovskite Measured to 25 GPa and 1 200 K. *Geophysical Research Letters*, 39(19): 1—15. <https://doi.org/10.1029/2012gl053075>
- Coppari, F., Smith, R. F., Eggert, J. H., et al., 2013. Experimental Evidence for a Phase Transition in Magnesium Oxide at Exoplanet Pressures. *Nature Geoscience*, 6(11): 926—929. <https://doi.org/10.1038/ngeo1948>
- Crowhurst, J. C., Brown, J. M., Goncharov, A. F., et al., 2008. Elasticity of (Mg, Fe)O through the Spin Transition of Iron in the Lower Mantle. *Science*, 319(5862): 451—453. <https://doi.org/10.1126/science.1149606>
- Darling, K. L., Gwanmesia, G. D., Kung, J., et al., 2004. Ultrasonic Measurements of the Sound Velocities in Polycrystalline San Carlos Olivine in Multi-Anvil, High-Pressure Apparatus. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 143/144: 19—31. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2003.07.018>
- Duan, Y. F., Li, X. Y., Sun, N. Y., et al., 2018. Single-Crystal Elasticity of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-Spinel up to 10.9 GPa and 1 000 K: Implication for the Velocity Structure of the Top Upper Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 481: 41—47. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.014>

- Duffy, T. S., 2008a. Mineralogy at the Extremes. *Nature*, 451 (7176): 269–270. <https://doi.org/10.1038/nature06584>
- Duffy, T. S., 2008b. Some Recent Advances in Understanding the Mineralogy of Earth's Deep Mantle. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 366(1883): 4273–4293. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0172>
- Duffy, T. S., Smith, R. F., 2019. Ultra-High Pressure Dynamic Compression of Geological Materials. *Frontiers in Earth Science*, 7: 23. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00023>
- Duffy, T. S., Zha, C. S., Downs, R. T., et al., 1995. Elasticity of Forsterite to 16 GPa and the Composition of the Upper Mantle. *Nature*, 378(6553): 170–173. <https://doi.org/10.1038/378170a0>
- Duffy, T. S., Madhusudhan, N., Lee, K. K. M., 2015. Mineralogy of Super-Earth Planets. In: Schubert, G. ed., *Treatise on Geophysics*. Elsevier, Amsterdam, 149–178.
- Dziewonski, A. M., Anderson, D. L., 1981. Preliminary Reference Earth Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4): 297–356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7)
- Every, A. G., 1980. General Closed-Form Expressions for Acoustic Waves in Elastically Anisotropic Solids. *Physical Review B*, 22(4): 1746–1760. <https://doi.org/10.1103/physrevb.22.1746>
- Fan, D. W., Fu, S. Y., Yang, J., et al., 2019. Elasticity of Single-Crystal Periclase at High Pressure and Temperature: The Effect of Iron on the Elasticity and Seismic Parameters of Ferropiclase in the Lower Mantle. *American Mineralogist*, 104(2): 262–275. <https://doi.org/10.2138/am-2019-6656>
- Fei, Y. W., Seagle, C. T., Townsend, J. P., et al., 2021. Melting and Density of MgSiO<sub>3</sub> Determined by Shock Compression of Bridgmanite to 1 254 GPa. *Nature Communications*, 12: 876. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21170-y>
- Fu, S. Y., Yang, J., Lin, J. F., 2017. Abnormal Elasticity of Single-Crystal Magnesiosiderite across the Spin Transition in Earth's Lower Mantle. *Physical Review Letters*, 118(3): 036402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.036402>
- Fu, S. Y., Yang, J., Tsujino, N., et al., 2019. Single-Crystal Elasticity of (Al, Fe)-Bearing Bridgmanite and Seismic Shear Wave Radial Anisotropy at the Topmost Lower Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 518: 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.04.023>
- Fu, S. Y., Yang, J., Zhang, Y. Y., et al., 2018. Abnormal Elasticity of Fe-Bearing Bridgmanite in the Earth's Lower Mantle. *Geophysical Research Letters*, 45:4725–4732.
- Fukao, Y., Obayashi, M., 2013. Subducted Slabs Stagnant Above, Penetrating Through, and Trapped below the 660 Km Discontinuity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(11): 5920–5938. <https://doi.org/10.1002/2013jb010466>
- Gorman, M. G., McGonegle, D., Tracy, S. J., et al., 2020. Recovery of a High-Pressure Phase Formed under Laser-Driven Compression. *Physical Review B*, 102(2): 024101. <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.024101>
- Gréaux, S., Irifune, T., Higo, Y., et al., 2019. Sound Velocity of CaSiO<sub>3</sub> Perovskite Suggests the Presence of Basaltic Crust in the Earth's Lower Mantle. *Nature*, 565(7738): 218–221. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0816-5>
- Gréaux, S., Kono, Y., Wang, Y. B., et al., 2016. Sound Velocities of Aluminum-Bearing Stishovite in the Mantle Transition Zone. *Geophysical Research Letters*, 43(9): 4239–4246. <https://doi.org/10.1002/2016gl068377>
- Gwanmesia, G. D., Wang, L. P., Heady, A., et al., 2014. Elasticity and Sound Velocities of Polycrystalline Grossular Garnet (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>) at Simultaneous High Pressures and High Temperatures. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 228: 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2013.09.010>
- Higo, Y., Irifune, T., Funakoshi, K. I., 2018. Simultaneous High-Pressure High-Temperature Elastic Velocity Measurement System up to 27 GPa and 1 873 K Using Ultrasonic and Synchrotron X-Ray Techniques. *The Review of Scientific Instruments*, 89(1): 014501. <https://doi.org/10.1063/1.4993121>
- Huang, H. J., Fei, Y. W., Cai, L. C., et al., 2011. Evidence for an Oxygen-Depleted Liquid Outer Core of the Earth. *Nature*, 479(7374): 513–516. <https://doi.org/10.1038/nature10621>
- Huang, H., Leng, C., Wang, Q., et al., 2019. Equation of State for Shocked Fe-8.6 wt% Si up to 240 GPa and 4,670 K. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124: 8300–8312.
- Irifune, T., Higo, Y., Inoue, T., et al., 2008. Sound Velocities of Majorite Garnet and the Composition of the Mantle Transition Region. *Nature*, 451(7180): 814–817. <https://doi.org/10.1038/nature06551>
- Jing, Z. C., Wang, Y. B., Kono, Y., et al., 2014. Sound Velocity of Fe-S Liquids at High Pressure: Implications for the Moon's Molten Outer Core. *Earth and Planetary Science Letters*, 396: 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.04.015>
- Jing, Z. C., Yu, T., Xu, M., et al., 2020. High-Pressure Sound Velocity Measurements of Liquids Using in Situ

- Ultrasonic Techniques in a Multianvil Apparatus. *Minerals*, 10(2): 126. <https://doi.org/10.3390/min10020126>
- Kennett, B. L. N., Engdahl, E. R., Buland, R., 1995. Constraints on Seismic Velocities in the Earth from Travel-times. *Geophysical Journal International*, 122(1): 108—124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x>
- Kennett, B.L.N., Widiyantoro, S., van der Hilst, R.D., 1998. Joint Seismic Tomography for Bulk Sound and Shear Wave Speed in the Earth's Mantle. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 103: 12469—12493.
- Kurnosov, A., Marquardt, H., Frost, D. J., et al., 2017. Evidence for a Fe<sup>3+</sup>-Rich Pyrolytic Lower Mantle from (Al, Fe)-Bearing Bridgmanite Elasticity Data. *Nature*, 543(7646): 543—546. <https://doi.org/10.1038/nature21390>
- Kuwabara, S., Terasaki, H., Nishida, K., et al., 2016. Sound Velocity and Elastic Properties of Fe-Ni and Fe-Ni-C Liquids at High Pressure. *Physics and Chemistry of Minerals*, 43(3): 229—236. <https://doi.org/10.1007/s00269-015-0789-y>
- Lai, X. J., Zhu, F., Liu, Y. X., et al., 2020. Elastic and Magnetic Properties of Fe<sub>3</sub>P up to Core Pressures: Phosphorus in the Earth's Core. *Earth and Planetary Science Letters*, 531: 115974. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115974>
- Li, B. S., Liebermann, R. C., 2007. Indoor Seismology by Probing the Earth's Interior by Using Sound Velocity Measurements at High Pressures and Temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(22): 9145—9150. <https://doi.org/10.1073/pnas.0608609104>
- Li, B. S., Liebermann, R. C., 2014. Study of the Earth's Interior Using Measurements of Sound Velocities in Minerals by Ultrasonic Interferometry. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 233: 135—153. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.05.006>
- Li, B. S., Zhang, J. Z., 2005. Pressure and Temperature Dependence of Elastic Wave Velocity of MgSiO<sub>3</sub> Perovskite and the Composition of the Lower Mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 151(1/2): 143—154. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2005.02.004>
- Li, B., Ji, C., Yang, W. G., et al., 2018. Diamond Anvil Cell Behavior up to 4 Mbar. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(8): 1713—1717. <https://doi.org/10.1073/pnas.1721425115>
- Li, B., Liebermann, R. C., Weidner, D. J., 1998. Elastic Moduli of Wadsleyite (Beta-Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) to 7 Gigapascals and 873 Kelvin. *Science*, 281(5377): 675—677. <https://doi.org/10.1126/science.281.5377.675>
- Li, M., Zhang, H.P., Chen, S., et al., 2022. Laser Driven Dynamic Compression of Materials. *High Power Laser and Particle Beams*, 34(1):1—24(in Chinese with English abstract).
- Lin, J. F., Mao, Z., Yang, J., et al., 2018. Elasticity of Lower-Mantle Bridgmanite. *Nature*, 564(7736): E18—E26. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0741-7>
- Lin, J. F., Sturhahn, W., Zhao, J. Y., et al., 2005. Sound Velocities of Hot Dense Iron: Birch's Law Revisited. *Science*, 308(5730): 1892—1894. <https://doi.org/10.1126/science.1111724>
- Liu, W., Kung, J., Li, B.S., 2005. Elasticity of San Carlos Olivine to 8 GPa and 1 073 K. *Geophysical Research Letters*, 32(16): L16301. <https://doi.org/10.1029/2005gl023453>
- Liu, X., Fan, L. L., Yang, G., et al., 2020. Hugoniot Equation of State of Cementite (Fe<sub>3</sub>C) up to 250 GPa and Its Geophysical Implications. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 306: 106506. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106506>
- Mao, Z., Fan, D. W., Lin, J. F., et al., 2015. Elasticity of Single-Crystal Olivine at High Pressures and Temperatures. *Earth and Planetary Science Letters*, 426: 204—215. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.045>
- Mao, Z., Jacobsen, S. D., Frost, D. J., et al., 2011. Effect of Hydration on the Single-Crystal Elasticity of Fe-Bearing Wadsleyite to 12 GPa. *American Mineralogist*, 96(10): 1606—1612. <https://doi.org/10.2138/am.2011.3807>
- Mao, Z., Jacobsen, S. D., Jiang, F., et al., 2008. Single-Crystal Elasticity of Wadsleyites, B-Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, Containing 0.37 - 1.66 WT.% H<sub>2</sub>O. *Earth and Planetary Science Letters*, 266(1/2): 78—89. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.10.045>
- Mao, Z., Lin, J. F., Jacobsen, S. D., et al., 2012a. Sound Velocities of Hydrous Ringwoodite to 16 GPa and 673 K. *Earth and Planetary Science Letters*, 331/332: 112—119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.03.001>
- Mao, Z., Lin, J. F., Liu, J., et al., 2012b. Sound Velocities of Fe and Fe-Si Alloy in the Earth's Core. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(26): 10239—10244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207086109>
- Mao, Z., Sun, N. Y., Wei, W., 2021. Perspective for Elasticity of Minerals in the Earth's Top Lower Mantle. *National Science Review*, 8(4): nwaa270. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa270>
- Marquardt, H., Speziale, S., Reichmann, H. J., et al., 2009. Elastic Shear Anisotropy of Ferroprecipitate in Earth's Lower Mantle. *Science*, 324(5924): 224—226. <https://doi.org/>

- 10.1126/science.1169365
- Marquardt, H., Thomas, A. R., 2020. Experimental Elasticity of Earth's Deep Mantle. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(9): 455–469. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0077-3>
- Murakami, M., Ohishi, Y., Hirao, N., et al., 2012. A Perovskitic Lower Mantle Inferred from High-Pressure, High-Temperature Sound Velocity Data. *Nature*, 485(7396): 90–94. <https://doi.org/10.1038/nature11004>
- Murakami, M., Sinogeikin, S. V., Bass, J. D., et al., 2007a. Sound Velocity of MgSiO<sub>3</sub> Post-Perovskite Phase: a Constraint on the D'' Discontinuity. *Earth and Planetary Science Letters*, 259(1/2): 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.04.015>
- Murakami, M., Sinogeikin, S. V., Hellwig, H., et al., 2007b. Sound Velocity of MgSiO<sub>3</sub> Perovskite to Mbar Pressure. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(1/2): 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.01.011>
- Nishida, K., Shibazaki, Y., Terasaki, H., et al., 2020. Effect of Sulfur on Sound Velocity of Liquid Iron under Martian Core Conditions. *Nature Communications*, 11: 1954. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15755-2>
- Nishida, K., Suzuki, A., Terasaki, H., et al., 2016. Towards a Consensus on the Pressure and Composition Dependence of Sound Velocity in the Liquid Fe-S System. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 257: 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.06.009>
- Polian, A., 2003. Brillouin Scattering at High Pressure: An Overview. *Journal of Raman Spectroscopy*, 34:633–637.
- Prakapenka, V. B., Kubo, A., Kuznetsov, A., et al., 2008. Advanced Flat Top Laser Heating System for High Pressure Research at GSECARS: Application to the Melting Behavior of Germanium. *High Pressure Research*, 28(3): 225–235. <https://doi.org/10.1080/08957950802050718>
- Sakairi, T., Sakamaki, T., Ohtani, E., et al., 2018. Sound Velocity Measurements of Hcp Fe-Si Alloy at High Pressure and High Temperature by Inelastic X-Ray Scattering. *American Mineralogist*, 103:85–90.
- Sandberg, R., Milathianaki, D., Nagler, B., et al., 2015. Ultrafast Visualization of Crystallization and Grain Growth in Shock-Compressed SiO<sub>2</sub>. *Nature Communications*, 6 (Sep.): 8191.
- Schulze, K., Marquardt, H., Kawazoe, T., et al., 2018. Seismically Invisible Water in Earth's Transition Zone? *Earth and Planetary Science Letters*, 498: 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.06.021>
- Shibazaki, Y., Ohtani, E., Fukui, H., et al., 2012. Sound Velocity Measurements in DHCP-FeH up to 70 GPa with Inelastic X-Ray Scattering: Implications for the Composition of the Earth's Core. *Earth and Planetary Science Letters*, 313/314: 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.11.002>
- Sinogeikin, S. V., Bass, J. D., 2000. Single-Crystal Elasticity of Pyrope and MgO to 20 GPa by Brillouin Scattering in the Diamond Cell. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 120(1/2): 43–62. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(00\)00143-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(00)00143-6)
- Sinogeikin, S. V., Bass, J. D., Katsura, T., 2003. Single-Crystal Elasticity of Ringwoodite to High Pressures and High Temperatures: Implications for 520 Km Seismic Discontinuity. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 136(1/2): 41–66. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(03\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(03)00022-0)
- Smith, R. F., Eggert, J. H., Jeanloz, R., et al., 2014. Ramp Compression of Diamond to Five Terapascals. *Nature*, 511(7509): 330–333. <https://doi.org/10.1038/nature13526>
- Takahashi, S., Ohtani, E., Sakamaki, T., et al., 2019. Sound Velocity of Fe<sub>3</sub>C at High Pressure and High Temperature Determined by Inelastic X-Ray Scattering. *Comptes Rendus Geoscience*, 351(2/3): 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.09.005>
- Terasaki, H., Rivoldini, A., Shimoyama, Y., et al., 2019. Pressure and Composition Effects on Sound Velocity and Density of Core-Forming Liquids: Implication to Core Compositions of Terrestrial Planets. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124(8): 2272–2293. <https://doi.org/10.1029/2019je005936>
- Thomson, A. R., Crichton, W. A., Brodholt, J. P., et al., 2019. Seismic Velocities of CaSiO<sub>3</sub> Perovskite can Explain LLSVPS in Earth's Lower Mantle. *Nature*, 572(7771): 643–647. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1483-x>
- Tracy, S. J., Turneaure, S. J., Duffy, T. S., 2018. In Situ X-Ray Diffraction of Shock-Compressed Fused Silica. *Physical Review Letters*, 120(13): 135702. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.135702>
- van der Hilst, V., Karason, H., 1999. Compositional Heterogeneity in the Bottom 1 000 Kilometers of Earth's Mantle: Toward a Hybrid Convection Model. *Science*, 283(5409): 1885–1888. <https://doi.org/10.1126/science.283.5409.1885>
- Wang, J. Y., Sinogeikin, S. V., Inoue, T., et al., 2006. Elastic Properties of Hydrous Ringwoodite at High-Pressure Conditions. *Geophysical Research Letters*, 33(14): L14308. <https://doi.org/10.1029/2006gl026441>
- Wang, X. L., Tsuchiya, T., Hase, A., 2015. Computational

- Support for a Pyroclitic Lower Mantle Containing Ferric Iron. *Nature Geoscience*, 8(7): 556–559. <https://doi.org/10.1038/ngeo2458>
- Wicks, J. K., Jackson, J. M., Sturhahn, W., 2010. Very Low Sound Velocities in Iron-Rich (Mg, Fe)O: Implications for the Core-Mantle Boundary Region. *Geophysical Research Letters*, 37(15): 25–35. <https://doi.org/10.1029/2010gl043689>
- Wicks, J. K., Smith, R. F., Fratanduono, D. E., et al., 2018. Crystal Structure and Equation of State of Fe-Si Alloys at Super-Earth Core Conditions. *Science Advances*, 4(4): eaao5864. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao5864>
- Xu, C. W., Gréaux, S., Inoue, T., et al., 2020a. Sound Velocities of Al-Bearing Phase D up to 22 GPa and 1 300 K. *Geophysical Research Letters*, 47(18): 152–168. <https://doi.org/10.1029/2020gl088877>
- Xu, M., Jing, Z. C., Bajgain, S. K., et al., 2020b. High-Pressure Elastic Properties of Dolomite Melt Supporting Carbonate-Induced Melting in Deep Upper Mantle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(31): 18285–18291. <https://doi.org/10.1073/pnas.2004347117>
- Xu, M., Jing, Z. C., Chantel, J., et al., 2018. Ultrasonic Velocity of Diopside Liquid at High Pressure and Temperature: Constraints on Velocity Reduction in the Upper Mantle Due to Partial Melts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10): 8676–8690. <https://doi.org/10.1029/2018jb016187>
- Yang, J., Lin, J. F., Jacobsen, S. D., et al., 2016. Elasticity of Ferropericlaase and Seismic Heterogeneity in the Earth's Lower Mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(12): 8488–8500. <https://doi.org/10.1002/2016jb013352>
- Yang, R., Wu, Z. Q., 2014. Elastic Properties of Stishovite and the CaCl<sub>2</sub>-Type Silica at the Mantle Temperature and Pressure: an Ab Initio Investigation. *Earth and Planetary Science Letters*, 404: 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.020>
- Zhang, J. S., Bass, J. D., 2016. Single-Crystal Elasticity of Natural Fe-Bearing Orthoenstatite across a High-Pressure Phase Transition. *Geophysical Research Letters*, 43(16): 8473–8481. <https://doi.org/10.1002/2016gl069963>
- Zhang, Y. Y., Fu, S. Y., Wang, B. Y., et al., 2021. Elasticity of a Pseudoproper Ferroelastic Transition from Stishovite to Post-Stishovite at High Pressure. *Physical Review Letters*, 126(2): 025701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.025701>
- 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).

#### 附中文参考文献

- 李牧, 张红平, 陈实, 等, 2022. 激光驱动材料动态压缩技术. *强激光与粒子束*, 34(1):1–24.
- 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.