

地球深部探索与高压研究*

谢鸿森 侯渭 周文戈 郭捷

(中国科学院地球化学研究所 地球动力学高温高压开放研究实验室 贵阳 550002)

摘要 地球内部是一个复杂的高温高压系统,地球核心的压力约 360GPa,温度约 5000℃.地球内部物质在高温高压条件下演化成为目前的地球层圈结构.在地球表面发生的许多重大的地质事件,都与高温高压条件下地球深部物质的性质密切相关.文章介绍了近年来高压物质科学的某些研究现状,并提出若干地球科学中急待研究的科学问题.

关键词 高温高压,地球,物质,性质

DEEP EARTH EXPLORATION AND HIGH-PRESSURE RESEARCH

XIE Hong-Sen HOU Wei ZHOU Wen-Ge GUO Jie

(*Institute of Geochemistry, Laboratory of Geodynamics Under High Temperature and High Pressure, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*)

Abstract The earth's interior is a complicated system with a high temperature of 5000℃ and a high pressure of 360GPa, approximately. The earth's layer-ring structure has evolved from the core material under high pressure and high temperature, giving rise to many momentous geological events in the earth's surface we review the status of current research in high-pressure materials science and indicate areas in geoscience requiring urgent examination.

Key words high temperature, high pressure, earth, material, property

1 引言

地球内部是一个复杂的高温高压系统,其温度压力从地表的常温常压连续过渡到地核的极端高温高压环境,地球核心的压力约为 360 GPa,温度约为 5000℃.地球内部物质在各种不同的温压条件和化学环境下经历了几十亿年的演化,形成了目前的岩石圈、地幔和地核的层圈结构(见图 1).地球仍在演化之中,在地球表面及内部发生的许多重大的地质、地球物理和地球化学事件,如板块运动、火山和地震爆发、成矿作用等都与高温高压条件下地球深部物质的性质和状态密切相关.

地球科学的早期都是在地表进行观察和采样研究的.目前,除地表观测和采样外,钻探是一种对地球进行直接观测和采样的方法.然而,由于难度大、成本高,钻探的深度一直非常有限.即使是超深钻探,目前到达的最大深度也不超过 14km.这个深度

只相当于地球半径的千分之二左右.可见,面对地球这样庞大的研究对象,光靠直接观测和采样研究是非常不够的.随着地球科学的发展,出现了许多观测和研究方法,可归纳为三个方面:一是地球科学与物理学相结合,形成了地球物理学的观测和研究方法,发展中产生了多个分支学科,如地震学、地电学、重力学和地磁学等;二是地球科学与化学(包括天体化学)相结合,形成了地球化学的观测和研究方法,发展过程中又产生了元素地球化学、同位素地球化学、矿床地球化学等;三是地球科学与实验科学相结合,形成了以高温高压实验为主的研究方法.由于地球内部是一个复杂的高温高压体系,因而在地球科学领域中的高温高压实验研究占主要地位.

* 国家自然科学基金重点基金(批准号:10032040)资助项目
2000-08-11 收到初稿,2000-11-10 修回

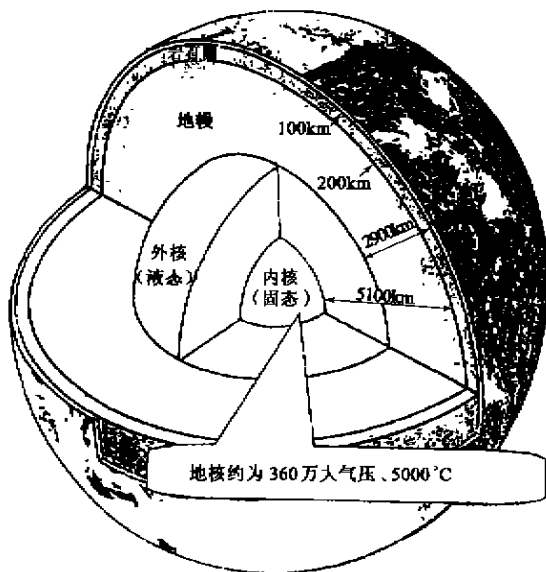


图 1 地球的层圈结构图

2 地学中的高温高压实验技术

地学中最早的高温高压实验研究可追溯到 19 世纪,其实验手段主要来源于物理化学的实验方法,实验内容偏重于矿物合成、岩石的熔融-结晶,以及水热成矿实验等。经过 100 多年的发展,这类实验在发展成矿作用的热力学理论、晶体生长实验和理论、认识岩浆岩的形成和演化等方面作出了重要的贡献,也逐步形成了实验矿物学、实验岩石学和实验地球化学等分支学科。这类实验的主要设备是各类高压釜装置,其实验压力大多限于 10000 大气压之内,温度一般在 1000°C 以下,实验模拟的条件限于地壳范围^[1]。

20 世纪 40 年代发展起来的静态超高压实验研究,实验技术来源于人工合成金刚石和高压物理实验,60—70 年代引进地球科学领域后得到了长足的发展,并发展成为金刚石压腔和静高压大腔体两大系列实验设备和实验技术。这类实验研究能实现的压力和温度都比上述水热高温高压实验高得多。实验研究的内容涉及下地壳、地幔和地核物质的物理和化学性质,并产生了一系列新的高压分支学科,如高压矿物学、高压矿物物理学、高压岩石力学和地球深部物质科学等。

动高压实验技术是由于军事上的需要发展起来的。由于核试验和空间探测本身与地球科学的关系密切,动高压实验研究很早(20 世纪 60—70 年代)就涉及矿物、岩石样品,并逐步涉足地球的内核、幔物

质状态,地外小行星撞击地球引起地质灾变等问题的研究。动高压实验结果还可作为设计静态超高压实验的边界条件,并可以与静态超高压实验结果进行相互验证。

3 当前开展高温高压研究的迫切性和可能性

20 世纪 60 年代以来,地学领域发生了两大革命性的事件:一是登月和空间探测获得成功,大大增加了太阳系各行星,特别是月球和类地行星的探测资料,也为探索地球的整体物质组成、形成和演化提供了旁证;二是地球板块学说的建立和发展,将地表发生的许多地质现象纳入了板块运动的体系,确立了地球表层物质运动的基本模式,也引发了一系列探索板块运动机制、解决板块驱动力问题的全球性的地学深部探测计划的实施^[2,3]。从此,人类进入了以探索地球深部——地幔和地核为主要目标,对地球进行全面和整体研究的新时期。

在全球性的深部探测活动中,地球物理学的多种观测方法一直是最重要的研究手段。特别是高新技术和计算方法的应用,使有关岩石圈板块、地幔和地核的地球物理资料空前的丰富,也提出了多种新的地幔和地核结构模式及物理模型。比如,根据全球地震测量资料,使用地震层析成像技术完成了大量的地球内部的 CT 图。这些 CT 图给出了许多区域和地球各层圈界面形态的三维地震层析图像,在多方面对传统模型进行了修正。比如,过去认为大洋板块向下俯冲的深度约 670 km,相当于地幔过渡带的深度。现在的资料表明,大洋板块最深可俯冲进入深度为 2900 km 的核幔边界。过去认为核幔边界是一个简单的球形,现在发现此界面有较大的地形起伏^[4]。然而,这些地震层析三维图像给出的大多是地球深部某处的地震波速度的分布资料,缺乏相应条件下的物质成分、结构及其性质方面的实验资料,因而难以与地球表层伴随大量物质演化的板块运动机制、驱动力等问题相联系。为此,当前急需开展与之有关的高温高压实验研究,在实验室模拟地球深部温度、压力、氧逸度以及其他物理化学条件,测定物质的结构和物性特征及其随温度压力的变化。这些实验资料将是对全球性的地球物理观测资料进行物质解释的依据,也是最终解决板块形成和驱动力的地球动力学、整体地球成分、状态和物质演化等问题必要的基础数据。

开展地球深部领域的高温高压实验研究需要的条件都已成熟:目前,金刚石压腔、静高压大腔体和物理

动高压实验技术已成为开展地球深部领域高温高压三大高压实验技术系列,且在实验技术上各有所长,互相补充.使用这些高压实验技术,能在实验室中模拟从地表至地核各层圈的压力和温度,加上与各类测试仪器的联合使用,能在高温高压下完成地球深部的多种模拟实验.其中金刚石压腔目前能达到的最高静压为 550 万大气压^[5],超过地球核心的压力.最高加热温度达到了 6000℃ 以上.金刚石压腔已实现了与多种物理测试仪器的联用,便于进行小样品在高温高压下多种物性的就位测量.特别是金刚石压腔与同步辐射技术、中子技术以及激光技术的联合使用,使各类物质(从固体至固化的气体)的多种物性的测量成为了可能.大腔体技术实现的静压力和温度比金刚石压腔低,一般在 30 万大气压和 2000℃ 以下.但高压腔体大,能装入复杂成分的样品如矿物集合体、岩石、熔体和流体等,进行多项物理性质和化学变化的实验研究.动高压实验装置适用于大的矿物集合体和岩石样品,在瞬间(μs)获得 500 万大气压的高压和 6000℃ 以上的高温,主要用于地幔和地核物质状态方程方面的实验研究.

地质学、矿物学、岩石学、同位素地球化学等对地表露出的来自上地幔岩石的研究(玄武岩以及其中橄榄岩包体的研究,金伯利岩的研究等),提供了大量有关上地幔物质成分和结构构造的资料,这些资料可作为开展高温高压实验选用原始物料的依据.在有的实验研究中,这些来自上地幔的岩石也可作为实验原始物料使用.此外,行星探测和天体化学研究提出了多种地球的整体成分模型,为确定地幔和地核的整体成分提供了依据,这对于模拟地幔和地核的高温高压实验原始物料的选择也有重要意义.目前,根据这些资料所推断的地幔和地核成分模型还是多解的,比如,地幔成分究竟是橄榄石组合的,还是辉石+石榴子石组合?外核中除铁外,最多的轻元素是硫还是氧?等等.但是这些研究资料毕竟将地幔和地核的成分限定在一定的范围之内,因而大大降低了实验的盲目性.

全球性的地球物理测量以及相关的理论计算,提供了地球深部更为详尽的有关深度、密度、压力、温度等方面的资料,也提出了许多新问题、新假说和新模式.它们是设计高温高压实验内容、确定实验温度、压力等条件的依据.比如,根据核-幔界面不平坦的特点推断在核幔界面处,地幔底部的硅酸盐与地核的金属可能发生化学反应.据此,进行了相应高压下金属与硅酸盐的反应实验,实验发现金属熔融

时金属侵蚀了固态硅酸盐颗粒的外部,从而认为地核中的流体在核-幔边界区可能上升进入地幔几十米至几十米.

4 高温高压矿物物理实验研究的贡献

高温高压实验研究所获得的成果正不断改变着我们对地幔和地核的认识,也为最终全面和整体认识地球的形成和演化准备了丰厚的实验资料.其中高压矿物物理实验研究方面的成就最为突出.这方面的实验主要是使用由金刚石压腔高压装置完成的,实验内容主要涉及地幔和地核矿物和金属的高压结构(相变)及其他物性测量.根据这些实验结果,基本确立了地幔中几个地震不连续面与矿物高压相变的关系,并建立了地幔的矿物学模型^[6].在此前,我们只模糊地知道地幔主要由橄榄岩组成,现在我们能明确地说出,在地幔 200—400km 深处,橄榄石先转变为畸变的尖晶石结构相(橄榄石 β 相),再转变为尖晶石结构相(橄榄石 γ 相);辉石+石榴子石组合先转变为镁铁榴石结构相(majorite),再转变为钛铁矿相.600km 之下的地幔,则以钙钛矿结构相为主.有关外核物质的高压实验发现,在外核的压力下,FeO 由石盐结构相转变为 NiAs 结构,这时的氧具有合金元素的性质.这一实验结果表明氧可能是外核的轻元素之一^[7].

在高压矿物物理的实验研究中,美国华盛顿卡内基地球物理实验室以毛河光为首的研究组作出了突出的贡献.他们在金刚石压腔上获得了最高静压力,并在物质性质测量方面做出了创新性的成果.他们目前的高压实验研究对象已由地幔、地核矿物扩大到了几乎所有的元素,高压下测定的内容也几乎囊括了物质所有的物理性质.表 1 列出了目前金刚石压腔高压实验中使用的物理测量技术、研究对象和测量的物性内容.可以看出,除物质的表面性质之外,几乎所有的物理和化学性质在高压下都能实现就位物性测量.因此,高压矿物物理学的发展不仅超出了地学的范围,也超出了物理学的范围,从而形成了一门研究高压下物质的物理、化学及多种性质的交叉学科——高压物质科学(high pressure physical science).高压物质科学的兴起和发展将人类的观察视线带入了一个全新的高压世界,也必将引起许多领域的变革和发展.比如,高压实验发现,在从常压增至 100 万大气压的过程中,物质平均出现 5 次相变,这个实验结果在某种意义上丰富了周期表的内容.常压下化学性质不活泼的惰性元素在高压下能

形成化合物;常压下的绝缘体在高压下能成为导体;常压下的晶体在高压下可转变为非晶态;高温高压下所有的硅氧四面体将转变为八面体.这一系列的实验结果将可能发展形成新的高压矿物学和高压地幔矿物学.水和CO₂等流体在高温高压下处于超临界状态,并出现了许多新奇的物理性质和化学性质.比如超临界水能大量溶解常温常压下化学惰性的金、铂等,还能将难降解的有机质和剧毒物降解为无毒气体.超临界流体的研究不仅为探讨水和流体在地球深部物质的演化、成岩成矿中的作用提供依据,而且在材料科学、工业生产和环境治理等方面也有应用价值,同时有可能发展成为高压化学的新领域.

表1 高压下物理性质测量情况一览表*

| 物理测试技术 | 测量的物理性质 | 研究对象 |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| X光 (EDXD, ADXD, XANES, EXAFS, XMCD, XED, IXSS, NRFS, Compton 散射) | 键性 晶体结构 非晶结构 非晶化 熔融 相变 化学动力学 | 氢 惰性气体 惰性气体化合物 轻元素 重元素 过渡族元素 |
| 可见光 Raman IR Brillouin ISS 荧光 光吸收 | 元素分配 占位度 有序-无序度 氧逸度 状态方程 弹性 蠕变 声子谱 | 镧系元素 铜系元素 笼形化合物 金属间化合物 稀土元素 热电物质 荧光物质 超硬材料 超导材料 |
| 电导 磁接受 中子散射 核磁共振 | 电子能带 金属化 自旋态 超导 磁性 | 半导体 能源材料 幔-核物质 有机物 生命物质 |

* 引自毛红光 2000年4月北京香山科学讨论会上的讲演稿

5 地球深部急待研究的高压问题

综观地球深部领域高温高压研究的发展现状,可归纳为以下几点:第一,金刚石压腔静高压实验技术和高压就位测量方法的进步,促进了高压矿物物理实验研究的发展,获得了大量系统的有关地幔和地核矿物高压相变和物理特征的实验资料,给出了地幔和地核物质组成和结构状态的基本框架.第二,涉及复杂样品(矿物集合体、岩石)的高温高压实验研究发展较慢.虽然近年来大腔体静高压实验在物性就位测量等方面取得了进展,但与地球样品的复杂性和物理化学性质的多样性相比,其实验数量和内容方面还远远不够.因此,已有的实验结果系统性差,难以进行综合对比和应用.第三,由于实验和测量技术的限制,固体样品的实验研究较多,高温高压

下物性测量的内容较全面,而涉及流体和熔体的实验研究较少,且物性测量的内容较单一.比如流体实验主要以测量其高温高压下的电导为主,而对熔体则以研究其熔体结构为主的实验较多.第四,鉴于以上几点,与岩石圈以及下伏软流层相关的高温高压模拟实验研究相当薄弱,还不能提供出有力的实验证据,用以解释板块运动机制和软流层的成因.

根据当前高温高压实验研究的现状,并结合我国地学领域高温高压实验技术的特点,近期内我们的研究目标是:对岩石圈的主要类型的岩石、软流层、地幔和地核物质,在模拟地球不同层圈的温度和压力条件下,进行物质的弹性、电性、粘滞性、热学性质和状态方程的就位测量研究,获得由岩石圈至地核的系统综合物性参数,为地球物理探测获得的各种物理场图像的反演和物质解释提供原始性数据,从而获得地球各层圈物质相互作用和层圈界面区性质的本质认识.

地球的物质组成和内部物理化学环境非常复杂,且几十亿年来一直处于不停的演变之中.所以,地球科学中的高温高压实验研究,在实验技术、观测方法、边界条件设定,以及实验结果的解释等方面都比其他领域要复杂得多.为了在模拟地球内部复杂的物理化学环境下进行物质多种性质的研究,需要将多种测量技术,温度、压力、氧逸度等条件下的控制技术,计算技术等运用到高温高压实验研究中来.同时要求在地学领域各学科的研究人员之间,以及地学与其他领域(如物理学、化学、数学等学科)的研究人员之间开展合作研究.在开展各类高温、高压实验研究的同时,应注意实验结果与野外观测资料的对比,动高压实验结果与静高压实验结果的对比,以便使实验结果更好地应用于地球深部的探索之中.

参 考 文 献

- [1] 谢鹤森等.地球深部物质科学导论.北京:科学出版社,1997 [XIE Hong-Sen et al. An Introduction to Physical Science in Earth's Interior. Beijing: Science Press, 1997 (in Chinese)]
- [2] A National Program for Research in Continental Dynamics CD/2020. Management By DOCECC Incorporated. The IRIS Consortium. 1989
- [3] A Science Plan for "Cooperative Studies of the Earth's Deep Interior(CSEDI)" Prepared by US SEDI Coordinating Committee. 1993
- [4] 徐有生,宋茂双译.地球科学进展.1994,9(增刊):23. [XU You-Sheng, SONG Mao-shuang trans. Advance in Earth Science 1994, 9(Supplement): 23 (in Chinese)]
- [5] Xu J A, Mao H K et al. Science, 1986, 232: 1404
- [6] XIE Hong-Sen et al. Chinese Science Bulletin, 1997, 41: 1815
- [7] Fei Y W, Mao H K. Science, 1994, 266: 1678