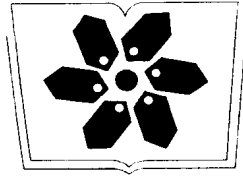


地球深部 物质科学导论

■ 谢鸿森 著

■ 科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版 国家自然科学基金委员会资助出版

地球深部物质科学导论

谢鸿森 等著

国家自然科学基金资助项目

中国科学院地球化学研究所

科学出版社

1997

内 容 简 介

本书介绍了新兴的边缘学科——地球深部物质科学的学科内容和理论,研究方法和有关的实验技术,特别是对静态超高压实验技术做了系统的介绍。作者从地球物质的整体性和相互依存性,以及“从原子到全球”的学术观点出发,运用地球物理学理论和探测结果,地球化学和地质学证据,以及高温超高压下物质的相变、存在状态,以及物理和化学性质的实验结果,对地球内部各层圈结构、物质组成与演化、层圈界面性质与物质运动方式等做了比较系统的阐述,并综述了这一研究领域中近年来的最新研究成果。本书的理论阐述力求基本概念清晰,由浅入深,并综合了大量的实验研究资料与数据。

本书适合于从事深部地质、地球物理、地球化学和地幔矿物学,以及高压物理和材料科学等领域的研究人员、实验技术人员阅读,也可作为有关高等院校和科研单位研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

地球深部物质科学导论/谢鸿森等著. —北京:科学出版社,
1997. 6
ISBN 7-03-005880-1

I. 地… II. 谢… III. 地球内部物理学 IV. P3

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第02601号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1997年6月第一版 开本:787×1092 1/16
1997年6月第一次印刷 印张:19 1/2
印数:1—1 000 字数:440 000

定价:48.00元

序

地球深部物质科学是固体地球科学中经过多年酝酿、培育和探讨逐渐成长起来的一门新的分支学科。它的研究内容主要涉及地球深部(下地壳、地幔、地核)物质组成、存在形式、物性状态以及核幔、上下地幔及壳幔相互作用和演化诸问题。

地幔和地核的物质组成及演化,人们是看不见也摸不到的。例外的是少量地幔样品可呈包体形式被俘获于一些碱性玄武岩、金伯利岩等岩类中。尽管它们数量甚少,但还是给出了一定的有关地球深部的信息。

现今人们对地幔和地核的认识、理解和探讨主要立足于两项研究,一是深部地球物理探测,一是高温超高压实验。两者近年来无论在方法、精度还是理论以及借鉴两者探讨核幔组成和演化方面均有了长足的进展。这些就构成了本书“地球深部物质科学”的基础。

当然,这本书并不只是国内外有关地幔和地核研究成果、动态、展望的报道和评述,而是融合了作者本人 20 多年来在静态高温超高压实验方面所进行的大量研究工作,这就使得这本书带有浓厚的学术探讨色彩。

地球深部物质科学,或称地球内部物质科学(Materials Science of the Earth's Interior)是深部地球物理、超高压物理、地球动力学、行星际科学、深部地球化学等学科的边缘杂交的产物,是固体地球科学的前沿。要想合理地、有充分依据地解释板块运动机制、地幔去气作用、大尺度全球变化、火山与地震灾害、成岩成矿作用等问题,人们总是不可避免地要联想到地球深部物质组成、结构及其演化。

这一领域目前我国尚处于起步不久阶段,相信本专著的出版将有助于推动我国深部物质科学研究的较大跨度的进展。

涂光焱

1995年12月29日

前 言

地球科学正处在向地球深部进行全面探索的新时期。地球深部物质科学就是为适应地球深部研究的需要而发展起来的一门新的边缘学科。该学科的形成有两方面的地学背景。第一,长期以来,采用多种地球物理学的观测方法进行深部的探测,一直是深部领域中最为活跃的因素。特别是随着高新技术和计算方法的应用,有关资料空前丰富,也得出了多种地幔和地核的结构模式和物理模型。然而,凡是涉及到有关物质成分的学科,如矿物学、岩石学、地球化学等学科,虽然通过地表分布的幔源岩石的研究,对岩石圈地幔的物质组成和运动状态已有了较详细的了解,但由于实际采样深度的限制,其探测深度一般限于200km以内。上述地球物理学和地球化学两大系列探测方法,在探测深度上的差异就造成了地球深部探测过程中的一大难题:深部多种地球物理模型由于缺乏物质内容,无法彼此检验,从而不能形成统一的认识;而较浅部的矿物学、岩石学、地球化学资料,虽然研究程度很高,却没有足够的根据向地球深部外推。因此如何通过一种媒介把两大系列的研究成果联系起来,就成为解决这一难题,推动地球深部研究领域向前发展的关键。为此,地球深部物质科学便应运而生。第二,60年代以来,被称为当代地学的两大革命事件,行星探测初获成功和板块学说的建立大大推动了地球深部研究的发展,也使地球深部领域有了更明确的研究目标。当前地球深部领域的研究范围已涉及地壳以下直至地球核心的整个地球深度,横向上包括了全球范围。所要研究的深部问题都是与地球表层种种地质作用密切相关的,其研究的主要目的之一是解决板块运动和驱动力——地球动力学问题,该问题的解决将为探讨成矿规律、全球环境变化、地震和火山等地质灾害的成因等提供依据。不仅要研究地球现在三维空间上的物质存在形式和运动,而且要研究它们在地球演化历史中的变化。通过一切可能的地质历史记录和模拟手段去探索地球形成后所经历的分异和演化过程,以及这些过程所伴随的一切作用的机理,从而了解地球的整个演化历史,并对它的未来做出可能的预测,进而解释造成地球与太阳系其它类地行星具有不同演化历史的原因。然而,由于地球内部的不可及性和深部极端高温高压下物质结构和运动状态的特殊性,实现上述地球深部领域的研究目标是一项十分复杂和艰难的任务。必须用整个一代的高新技术作为后盾,组织多学科的合作研究才有可能使之完成。地球深部物质科学就是为了实现上述目标,能把与地球深部有关的多个学科,如矿物学、矿物物理学、高压矿物物理学、岩石学、岩石力学、地质学、地球化学、地球物理学等多学科的学术思想、研究成果和探测方法结合起来,并能容纳化学、物理学、高压物理学、数学、计算技术等多种高新技术和研究方法来研究地球深部研究的一门新学科。

在地球科学领域中,地球深部物质科学是一个非常特殊的分支,它并不是以研究地

球某种属性为目标的。它的研究内容和目标可以简单概括为：研究组成地球深部的物质（矿物、岩石、熔体、流体等）的物理和化学性质和状态；以及从物质运动和演化的角度去研究地球深部的结构和动力学过程的科学。因此它研究的对象小至原子、离子，大至地球和行星。它是在矿物学、岩石学、矿物物理学、地球化学、地球物理学、地质学等学科基础上发展起来的一门边缘学科，又是实验性很强的学科。其实验研究结果是对地球物理观测资料进行反演和物质成分解释，以及对浅部地球化学资料向深部外推的依据。因此地球深部物质科学是联系地球物理学和地球化学两大系列学科之间的纽带和桥梁。随着地球物质科学的发展，将会为地球深部的观测结果和计算模拟结果赋予物质内容，最终形成对地球深部的物质组成、结构分层和动力学过程的统一认识，建立起适合于各学科使用的地球深部模型。因此，地球深部物质科学既是地球深部领域的一个重要组成部分，从某种意义上来说，它又是向地球深部探索不可超越的步骤。

因为地球深部物质科学是一门十分年轻的学科，目前与地球深部物质科学有关的论述和研究成果大都还分散在地球化学、地球物理、矿物物理、高压矿物物理、地幔岩石学等学科文献中，国内外也还没有一本专著对该学科的研究内容、研究方法、进展情况和主要研究成果作出系统介绍。为此，我们在参阅大量有关文献的基础上，根据多年从事该学科研究工作的积累，将自己对该学科的认识，及自己所在实验室和国内、外有关研究方法，研究成果进行综合和系统化后撰写成此书。希望读者通过阅读此书，对地球深部物质科学有一个较为系统的了解。由于本书所论及的地球深部物质科学是一个新的学科，因而书中对该学科的认识和内容的选择都可能存在局限性。书中还涉及有关固体物理学、极端高压高温下的状态方程和地球物理学等方面的理论，以及高压矿物物理学、实验地球化学和晶体生长等领域的研究方法和实验技术。而作者的专业知识和学术水平有限，书中错漏之处恳请读者提出批评并指正。

本书由绪论、上篇和下篇共十六章组成。绪论中较系统地介绍了地球深部物质科学的形成过程、发展历史、研究内容及研究方法等。上篇共四章，较详细介绍了应用于该学科研究的静态超高压实验技术和实验方法。其中金刚石压腔装置以国外资料为主；大腔体技术以笔者所在实验室的研究成果为主。下篇共十二章，从地球总体结构开始，由较浅部到最深层，运用地球物理的探测结果、矿物学、岩石学和地球化学的证据，及高温高压实验研究成果，多个侧面说明了目前对地球深部物质的成分、存在状态及运动方式等方面的认识。在内容上力求选用最新资料的同时，也用一定篇幅进行有关基本概念的介绍，从而便于各专业的读者阅读。

本书由谢鸿森提出编写大纲，并搜集了有关方面的大量资料。其中绪论、第一、四章由谢鸿森执笔，第二章由徐济安、谢鸿森执笔，第三章由谢鸿森、郭捷执笔，第六章由徐济安、侯渭、白武明执笔，第五、七、八、九章由侯渭执笔，第十章由郑海飞执笔，第十一章由朱卫国、王蔚执笔，第十二章由徐有生、苏根利、侯渭执笔，第十三章由傅容珊执笔，第十四、十五、十六章由侯渭、谢鸿森执笔。最后由谢鸿森进行统编定稿。

涂光炽院士、欧阳自远院士一直关心本书的编写和出版工作。涂光炽院士在百忙中为本书作序。陈颛院士对本书进行审定并提出了许多宝贵意见。中国科学院地球化学研究所地球深部物质研究室的张月明、徐惠刚、王筑明、许祖鸣等同志对本书的出版给予了多方面的帮助，本书中有的章节本身就反应了该室的工作成果。王世杰和曾毅强同志为本

书第十二章提供了部分资料。黄万才同志完成了本书大量图件的绘制。杨素华同志完成了本书的部分打字工作。谢洪源同志对本书作了审定和编辑工作。笔者对上述为本书出版付出辛勤劳动的同志表示衷心的感谢。

本书的出版得到中国科学院科学出版基金的资助和中国科学院地球物理研究所地球动力学高温高压开放研究实验室的资助，书中介绍的许多研究成果是由国家自然科学基金委员会资助项目获得的，在此一并致谢。

谢鸿森

1996年8月

目 录

序

前言

绪论	1
第一节 地球深部物质科学发展简史	1
第二节 地球深部物质科学的学科特点和研究内容	2
第三节 国外地球深部物质科学发展概况	3
第四节 我国地球深部物质科学的研究现状和发展前景	5
主要参考文献	7

上篇 应用于地球深部物质研究的静态超高压实验技术

第一章 静态超高压实验装置和实验技术综述	11
第一节 静态超高压实验技术的形成、发展及应用于地球科学研究的简单经过	11
第二节 静态超高压实验装置的一般原理与主要类型	13
第三节 传压介质与密封垫的使用及材料选择	17
第四节 静态超高压的测量方法	18
主要参考文献	23
第二章 金刚石压腔装置与实验技术	25
第一节 金刚石压腔装置与实验技术的形成和发展	25
第二节 金刚石压腔的结构及调准方法	26
第三节 金刚石压腔的加热装置和温度、压力测量	28
第四节 用于 100GPa 级压力实验和低温实验的金刚石压腔与实验技术	32
第五节 用于超高压 X 射线衍射测量的金刚石压腔装置	34
第六节 用于高压电导率测量的金刚石压腔与实验技术	35
第七节 用于高压谱学研究的金刚石压腔装置与实验技术	37
主要参考文献	40
第三章 静态超高压大腔体实验方法与实验技术	42
第一节 静态超高压大腔体实验技术的特点及现状	42
第二节 YJ-3000 吨压力机的紧装式六面顶超高压装置	43
第三节 高温下高压腔体压力标定方法	44
第四节 高压腔体温度测量	45
第五节 微电脑温压程序控制系统	47
第六节 高压腔体内温度的分布与加热器的选择	50
第七节 传压介质的选择及预处理	51

主要参考文献·····	116
第七章 地幔矿物合成与地幔矿物、岩石的物性特征 ·····	117
第一节 地幔矿物合成的意义·····	117
第二节 常压下地幔矿物单晶的生长方法·····	117
第三节 高温高压下地幔矿物的合成·····	119
第四节 高压合成橄榄石、斜方辉石、石榴子石固溶体系列的 X 射线衍射和 红外光谱研究·····	121
第五节 地幔矿物、岩石在常温常压下的弹性特征·····	126
第六节 高温高压下地幔矿物、岩石的弹性参数·····	130
第七节 高温高压下地幔矿物、岩石电学性质的研究·····	134
第八节 高温高压下地幔矿物的热学及其它物性的研究·····	139
主要参考文献·····	140
第八章 地幔矿物高压相变和地幔矿物学模型 ·····	143
第一节 有关的几个晶体化学参数·····	143
第二节 地幔矿物高压相的主要结构类型·····	145
第三节 SiO_2 、 $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$ 、 Al_2O_3 、尖晶石(MgAl_2O_4)等氧化物矿物的高压 相变·····	147
第四节 MgO-FeO-SiO_2 体系中橄榄石和辉石的高压相变·····	149
第五节 富 CaO 、 Al_2O_3 、 Na_2O 辉石的高压相变·····	153
第六节 地幔矿物学模型·····	155
主要参考文献·····	156
第九章 地幔的成分:元素、矿物和岩石 ·····	157
第一节 有关元素分类和丰度的几个概念·····	157
第二节 有关同位素比值的一些知识·····	159
第三节 地幔的总体化学成分·····	164
第四节 地幔的矿物组成和主要矿物种类·····	169
第五节 幔源岩石类型·····	171
第六节 玄武岩的主要种类及分布·····	171
第七节 超镁铁岩的主要种类及分布·····	174
第八节 金伯利岩及其超镁铁岩包体·····	176
第九节 造山带的高压变质岩·····	178
主要参考文献·····	179
第十章 上地幔化学 ·····	181
第一节 地幔的化学不均一性·····	181
第二节 地幔与地壳的物质交换·····	185
第三节 岩石圈演化的主要化学特征·····	187
主要参考文献·····	192
第十一章 熔融作用与岩浆熔体 ·····	194
第一节 熔融热力学·····	194

第二节	理论熔融模型	196
第三节	硅酸盐熔体结构	202
第四节	岩浆不混溶作用	207
第五节	岩浆熔体结构与岩浆粘度	209
	主要参考文献	212
第十二章	地球深部的超临界流体	215
第一节	超临界流体的一般特点	215
第二节	超临界(纯)水	218
第三节	超临界水溶液的性质	221
第四节	开展地球深部超临界流体研究的意义	225
第五节	赋存于地幔矿物中的水	226
第六节	岩浆熔体中的超临界水	230
第七节	地球深部含水相的分布	231
第八节	超临界水对地球深部物理化学环境的影响	232
第九节	地球深部的二氧化碳	235
第十节	地球动力学过程中的超临界流体问题	238
	主要参考文献	242
第十三章	地幔对流和地幔动力学	245
第一节	地幔对流假说的科学依据	245
第二节	地幔物质发生对流的物理背景	247
第三节	地幔对流模式的基本物理法则	248
第四节	外部力驱动下的地幔物质流动	251
第五节	地幔对流的结构模型	253
第六节	地球物理观测及地幔对流	258
第七节	地幔对流在地球动力学研究中的意义	264
	主要参考文献	271
第十四章	下地幔和核幔边界区物质的成分和状态	275
第一节	下地幔的成分模型	275
第二节	壳幔物质交换和相互作用的主要过程——板块俯冲带物质的运动特征	277
第三节	核幔物质交换和反应的壳幔表征——热点的分布和地幔热柱假说	281
第四节	核幔边界区 D'' 层的物性和成分特征	282
	主要参考文献	284
第十五章	地核物质的成分和状态	285
第一节	外核中轻元素成分的天体化学依据	285
第二节	Fe-FeS 和 Fe-Ni-S 体系的高压实验研究	286
第三节	15GPa 压力下 Fe-Ni-O-S 体系的实验研究	287
第四节	氧化铁的高压相变实验研究	288
第五节	高压下熔融铁中硅和氧的溶解以及铁-氢反应的实验研究	289

第六节 外核物质的运动状态.....	289
第七节 内核的物质成分.....	290
第八节 内核物质的状态.....	291
主要参考文献.....	292
第十六章 结语:地球物质演化的基本轮廓——目标和问题	294
主要参考文献.....	297

绪 论

自地质学诞生以来,人类对地球内部物质的探索就从未中止过。但是地球深部物质科学发展成为一门独立的学科,仅是近 10 多年的事。地球深部物质科学的英文名称为“Materials Science of the Earth's Interior”,所以也称为地球内部物质科学。

第一节 地球深部物质科学发展简史

一、发展简史

把地球深部物质作为一门独立的学科来研究,就必须有它特有的研究范围和研究方法。因此,该学科的起始阶段应追溯至本世纪 50 年代。那时高压物理学家开始在实验室进行高压下一些氧化物的合成和物性测量,并以此为依据对地幔的物质组成作了初步的推测。60—70 年代是该学科的准备和酝酿时期。一方面高温高压实验技术逐步被引入地球科学领域,为进行地幔和地核的多种模拟实验准备了条件;另一方面地球科学各领域如矿物学、岩石学、地球化学、地球物理学等学科得到了长足的发展,特别是板块构造学说的建立,使人们对地球表面和浅部的物质组成和运动规律有了比过去清楚得多的认识,为继续向地球深部探索打下了基础。70—80 年代以后地球深部物质科学逐步发展成为一门独立的学科,其主要标志是:①应用于地球科学研究的高温高压实验技术,特别是静态超高压实验技术得到了很大的发展。实验的温度和压力范围从地幔逐步向地核扩大,并建立了一系列高压下物质结构和物性就位测量方法,为开展地球深部物质的实验研究提供了重要的手段。其中美国卡内基地球物理实验室对金刚石压腔实验技术的发展,以及日本高压界对大腔体实验技术的发展作出了突出的贡献。科学家们利用静态超高压装置先后完成了地幔及地核矿物的合成和高压相变实验研究,建立了地幔矿物相变模式;进行了高压下矿物、熔体、岩石的多种物性测量;高压熔体结构、高压下岩石熔融—结晶实验研究,为探讨地幔和地核的物质组成和结构提供了大量的实验依据。其中美国的 Mao(毛河光);澳大利亚的 Ringwood、Liu(刘玲根);日本的 Akimoto 等作了大量的工作。②对直接来自上地幔的岩石矿物样品——各类超镁铁岩和玄武岩的综合研究取得了很大进展。查清了这些岩石的化学成分、同位素组成、矿物组合、形成年龄、来源深度以及它们的形成与板块构造运动的关系,从而奠定了地幔矿物学和地幔岩石学的基础,并将高温高压实验结果、地球物理观测资料等与地幔矿物学和岩石学相结合,建立了多种地幔成分模型。比如 Ringwood 的地幔岩模型,Anderson 建立的上地幔以橄榄岩为主,下地幔以辉石岩为主的地幔成分模型等都是突出的例证。③对地球深部物质的研究已不再只是岩石学家、矿物学家、地球化学家的研究对象,而成为地球科学各领域科学家关心的问题。特别是 80 年代以来,一系列全球性地球物理探测计划的实施,使地球物理学家迫切要求掌握地球内部物质

的成分和物性资料,以便对大量的观测结果作出物质成分方面的解释。例如,曾有的地球科学家把地球内部的矿物和岩石称为“地球物理物质”。从几次日-美双边高压合作研讨会文集的题目也可以看出这种认识上的变化:1977年和1982年出版的会议论文集题目为“高压研究在地球物理中的应用”,1987年为“高压研究在矿物物理中的应用”,而1992年为“高压研究在地球和行星科学中的应用”,而各文集所涉及的研究范围并无大的差别。由此看出,地球深部物质科学是在矿物学、岩石学、矿物物理学、地球化学、地球物理学、岩石物理学等多学科基础上发展起来的一门综合性边缘学科。

二、学科名称的由来

1984年美国科学家从地球物质的整体性出发,充分强调了地球深部物质的组成、运动和演化对解决地球整体演化和动力学问题的重要性,以及对地球表面和浅层矿产资源的开发、自然灾害的预测方面的意义,提出了“地球物质研究”的学科名称。1986年召开了有美国地球科学界多学科专家参加的专题讨论会。会后编写了同名的国家报告,对该学科的研究内容、技术路线等作了系统的阐述。从该报告的内容看,地球深部物质科学不仅仅是“地球物质研究”中的重要组成部分,而且是其核心内容。因而地球深部物质科学与“地球物质研究”在形成过程、学科特点方面是完全一致的。后者只不过是在前者的基础上涉及的范围稍有扩大而已。

在我国,长期习惯使用“深部”这一术语来命名涉及地球内部的学科名称,如“深部地质”、“深部地球化学”、“深部地球物理”等,同时也为了强调研究地球深部的重要性,所以采用了“地球深部物质科学”这一学科名称。

第二节 地球深部物质科学的学科特点和研究内容

一、地球深部物质科学的学科特点

地球深部物质科学作为一门独立的学科,它具有双重含义,一是要对组成地球的矿物、岩石、熔体等物质进行研究;二是从物质的角度来研究地球内部的层圈结构和动力学过程。因此该学科涉及的范围很广,综合性强,时空跨度大,并且特别强调实验研究的重要性。它要求从实验室高温高压条件下测定矿物、岩石、熔体、溶液的物理性质和化学性质入手,去解决全球性的物质演化问题。它的研究对象从原子、离子、矿物、岩石到地球的壳、幔、核直至整个地球和行星。它既要了解物质在实验室内瞬间的变化,又要掌握物质在整个地质时期的迁移和演化。因此地球深部物质科学与矿物学、岩石学、地球化学、矿物物理学、地球物理学有着密切的关系。它就是在这些学科基础上发展起来的一门边缘学科。地球深部物质科学不仅与地球科学各领域有着密切的关系,而且与其它自然科学领域也有密切的关系。比如它要从原子的角度,用键场力和形态学特点去解释矿物的结构和矿物的物理和化学性质。在这点上与材料科学、凝聚态物理和化学关系密切。但地球深部物质科学的时空跨度比这些学科要大的多。

在研究方法上地球深部物质科学很重视实验室和理论工作的结合,也需要大量的野

外实地考察和测量。它要求把最先进的仪器设备及计算技术用于矿物、岩石等地球深部物质的物理和化学性质的测定以及地球演化和动力学的实验模拟研究。同时要求进行全球性大范围的系统和科学的采样。地球深部物质科学强调与其它地球科学(特别是固体地球科学)在学科间的交叉,要求不同领域的科学工作者联合起来,加强协作,从不同的侧面对地球深部物质进行研究。了解矿物、岩石与大尺度地质现象之间的关系,进而对重大地球科学问题作出回答。

二、地球深部物质科学的研究内容

地球深部物质科学的研究内容可从以下三个层面加以说明:

1)地球深部物质的物理和化学性质的研究,主要指矿物的结构及物性,矿物高压相变研究;矿物集合体特征及矿物表面、界面对岩石物理性质的影响等方面的研究;熔融作用、熔体结构及其物性研究;水及流体与矿物、岩石相互作用的研究等。

2)地球内部物理和化学性质的研究。地球物质存在于地球内部各个部位,由于这些物质在成分、结构及其它一系列物理和化学性质上的差异,造成了地球内部在径向和横向的不均匀性。从元素、矿物、岩石的角度对这些不均匀性做出解释,从而建立地球的物质模型。其中的关键问题是对地球物理观测结果进行物质成分解释。

3)地球演化及地球动力学中的物质问题。这些问题的解决也是地球深部物质科学的最终目的。当前急待解决的问题有:①地幔对流中的物质问题;②地球内部物质的运移机理问题,指通过测量地球内部物质的成分、相平衡特征、状态方程、热化学特征、颗粒界面特征及根据地球内部物质的地球化学和同位素资料研究地球内部物质的熔融作用、流体运动、扩散、固态对流等机理;③大陆的形成和演化中的物质问题;④板块俯冲作用中的物质问题;⑤核—幔边界物质化学反应,地幔热柱的物质问题等。

第三节 国外地球深部物质科学发展概况

80—90年代以来,国外地球深部物质科学发展迅速,其研究成果与其它有关地球深部观测和研究结果密切结合,促使了人类彻底揭开地球深部奥秘的时代已经到来。其主要特点是:

1)静态超高压实验技术日臻完善,并已广泛应用于地球深部物质的实验研究。经过近20年的发展,静态超高压实验技术已发展成为相互补充,又各有分工的两大系列——金刚石压腔实验技术和大腔体实验技术。

在金刚石压腔实验技术的发展过程中,美国卡内基地球物理实验室作出了突出的贡献。该实验室已使其高压腔体的最高压力超过了地球中心的压力(350GPa),而达到了木星幔的压力(550GPa),并建立了多种谱学和结构及物性的测量方法。使金刚石压腔实验装置成为实现压力最高,测量方法最全,并广泛应用于地球深部物质科学的高压装置。近年来最为突出的进步是金刚石压腔与同步辐射源的联用,从而使极端高压下几乎所有物质都能进行X射线测量。

在大腔体实验技术的发展中,日本科学家做了大量的工作。由于大腔体装置的高压腔

体的容积是金刚石压腔的千倍以上,因而大腔体装置中能进行大量地幔矿物的合成。所获得的合成矿物是在金刚石压腔中进行高压实验的理想样品。大腔体中便于进行矿物集合体和岩石样品的地球化学和地球物理方面的测量,在这方面大腔体实验技术补充了金刚石压腔实验技术的不足,成为又一重要的静态超高压实验技术系列。近年来,日本科学家使用烧结金刚石来制做六面顶压砧,并与同步辐射源联用,进行样品高温高压下的 X 射线分析。此外,在大腔体装置上还建立了多种样品的物性测量方法,如弹性波速测量、非弹性参数的测量、电导率测量等。

2) 高温高压下地球深部物质的实验研究取得了突破性进展。以金刚石压腔和大腔体实验技术为主要手段的高温高压实验研究获得许多突破性进展,为探讨地幔和地核的物质组成、存在状态及动力学特征提供了大量的实验依据,主要可分为两大方面:①高温高压相变实验已从 70 年代单个氧化物、硅酸盐作为样品,发展成为与地幔成分更接近的 MgO-FeO-SiO_2 体系、 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 体系等的高压相变实验,完成了多个体系的高压相图,为建立地幔矿物相变的多维模式提供了依据。其中 80 年代发现的在高压下 (10GPa) 辉石和石榴子石的互溶形成的一种高压相——镁铁榴石 (majorite), 已被公认作为解释 400km 地震不连续面的依据。高压下矿物晶体结构分析取得了系统的晶格参数随压力变化的数据,研究了晶格中阳离子配位数随压力增加而增高的趋势,从而对地幔矿物相进行预测。在此基础上,建立了更接近于实际的地幔矿物成分模型。此外,在地核中铁与氢在高压下形成铁的氢化物的模拟实验研究;地幔中高压含水硅酸盐相的合成实验研究也都获得了成功。②高温高压下矿物和岩石样品的就位物性测量取得很大进展,特别是与地震学有关的高温高压弹性参数的测量,无论从测量的内容、精度及测量样品的范围方面都有很大提高。如金刚石压腔中通过布里渊散射测量,获得各种地幔硅酸盐矿物的弹性波速及有关弹性模量,以及矿物不同结晶轴方向波速和弹性模量上的各向异性。在大腔体装置上对幔源岩石进行了弹性波速与衰减系数;部分熔融程度与波速及衰减系数;破裂程度和应力状态与波速及衰减系数;含水和脱水与波速及衰减系数等关系的实验研究。这些实验结果为探讨板块俯冲带及地球深部波速的不均匀性分布及地球内部温度的分布提供了依据。

3) 运用新的高精度的弹性观测方法和计算技术进行全球性地球化学、地震学以及其它地球物理学测量,通过对其测量结果进行计算机数据处理和计算模拟,获得了多种地球深部物性和动力学模型。这些模型的建立提供了有关地球深部物质不均匀性详细的轮廓,同时又对地球深部物质研究提出了新的要求。例如根据地球化学观测资料建立的几种地幔对流模式;根据板块俯冲带附近火山岩中 ^{10}Be 的测量揭示出板块插入地幔的深度很可能超过了 670km;运用地震层析技术反演地球内部三维结构模型,揭示了板块俯冲带的高波速异常,推测下沉板块较冷;而热点之下的传波速度异常又成为判断地幔热柱的分布和来源深度的依据;地磁测量建立的地球模式揭示出核-幔边界可能有化学反应发生和地核内部有对流存在的可能性。这些物理模式的建立给地球深部物质研究提出了许多新问题,如:俯冲板块中含水矿物的脱水反应机制? 热点和热柱区元素的迁移和运动机制? 核-幔边界化学反应机制及其热效应等。这些问题的解决对于全球物质演化和动力学都是十分重要的。

4) 根据地球深部物质科学研究的多学科综合性的特点以及目前发展状况,各国都在

积极组织各学科科学家进行合作研究。同时国家间的合作也在逐步展开。其中居先进地位的是美国和日本。1991年在美国国家科学基金会的支持下,以卡内基地球物理实验室,纽约州立大学石溪分校和普林斯顿大学三家的有关高压部分联合成立了高压研究中心。这个中心是美国国家科学基金会1991年在全美资助建立的14个中心之一。该中心不仅充分利用自己在金刚石压腔技术方面的优势,继续开展地球深部的高压实验研究,比如对地幔硅酸盐矿物相中阳离子配位数随压力变化的研究;地核中铁的氢化物高压实验研究;地幔高压含水矿物的合成等。同时又从日本购进2000t的大腔体实验设备(最高压力为30GPa,温度2000℃),开展高温高压下地幔矿物的合成及有关岩石学、地球化学和地球物理学方面的实验。同时该中心对理论计算和模拟也给予了足够的重视。日本在1978—1980年就曾组织了由日本国内多个研究单位参加的“地球内部物质科学”的研究项目,由日本文部省资助8亿日元,1984年出版了同名的论文集。日、美科学家之间在高压方面的合作在美国国家科学基金会和日本学术振兴会的支持下,从1976年开始已持续到现在,举行了四次学术讨论会,并分别于1977、1982、1987、1992年出版了会议论文集。从一定意义上讲,这四部论文集代表了地球深部物质科学在实验方面的世界水平。80年代末,关于地球深部领域的国际间合作研究的参加国的范围扩大了,而且逐步向地球深层发展。1987年第19届IUGG大会上成立了地球深部研究(Studies of Earth Deep Interior缩写为SEDI)委员会。目前已召开过四次世界性学术讨论会。1992年6月在日本召开的第三届SEDI会议,共有16个国家的150名科学家参加,我国也派代表出席了会议。会议的中心议题是:核-幔界面的结构和动力学问题。会议所讨论的问题中大多都与地球深部物质科学有密切关系,或者本身就是地球深部物质科学研究的内容,如核幔边界金属铁和合金与硅酸盐反应的实验研究;热柱的结构、成分和起源;地球深部的不均匀性;核的形成、核幔对流等。同年8月美国CSEDI(地球深部合作研究)特别委员会向美国国家科学基金会提交了一个地球深部合作研究计划(A Science Plan for Cooperative Studies of the Earth's Deep Interior,缩写为CSEDI)。CSEDI委员会由美国在SEDI委员会的成员和AGU的SEI(Studies of Earth's Interior)委员会组成。在计划中所阐述的CSEDI的科学动因和具体研究计划中,大多涉及到地球深部物质科学的研究成果和进一步的研究任务。上述一系列合作和联合研究计划的进展情况标志着地球深部物质科学已进入了一个向深层发展并进行更高层次上的多学科联合研究的新阶段。

第四节 我国地球深部物质科学的研究现状和发展前景

一、我国地球深部物质科学的主要成就

1) 地球深部物质科学作为一门独立的学科已被我国地学界所认识,并逐步形成了专门的研究队伍。这些小的研究群体有的已从原有的学科中独立出来,专门从事该学科的研究;有的还隶属于地球物理或地球化学学科内,但从他们承担的课题和研究内容来看都超出了原来的学科范围,而跨两个以上的学科。如中国科学院地球化学研究所于1990年正式组建了“地球深部物质研究室”,近年来该研究室所承担的基金项目不少是从国家自然科学基金委员会地球物理学科申请的。而中国科学院地球物理研究所的一部分研究人