

- [6] R. G. Kepler, *Adv. Phys.*, **41**(1992), 1.
- [7] B. A. Newman et al., *Ferroelectrics*, **127**(1992), 229.
- [8] C. A. Araujo et al., *Ferroelectrics*, **116**(1991), 215.
- [9] J. F. Scott et al., *Physica B*, **150**(1988), 160.
- [10] W. L. Zhong et al., *Phys. Rev. B*, **50**(1994), 12375.
- [11] W. L. Zhong et al., *Phys. Lett. A*, **189**(1994), 121.
- [12] W. L. Zhong et al., *J. Phys.: Condens. Matter*, **5**(1993), 2619.
- [13] S. Schlag et al., *Solid State Commun.*, **91**(1994), 883.
- [14] W. L. Zhong et al., *Ferroelectrics*, **160**(1994), 55.
- [15] L. E. Cross, *Ferroelectrics*, **151**(1994), 305.
- [16] 闵乃本, *物理学进展*, **13**(1993), 26.
- [17] T. Tsurumi et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**(1994), 5192.
- [18] B. D. Qu et al., *Phys. Lett. A*, **189**(1994), 419.
- [19] D. Schwenk et al., *Ferroelectrics*, **104**(1990), 349.
- [20] 姚熹, *高技术新材料要览*(曾汉民主编), 中国科学技术出版社, (1993), 552.

高压物理研究在地球科学中的应用*

熊大和

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

摘要 高压物理是研究高压下物质状态、结构、特性及变化规律的学科。地球本身是一个巨大的高压实验室, 其内部物质无不经受高压作用。应用高压物理研究的新成就来探讨地球内部物质的相变和物性, 是一项重要课题。该文从地球层圈结构、地球内部物性分析入手, 重点阐明高压物理与地球科学的密切联系和发展交叉学科的重大意义。

关键词 高压物理, 地球科学, 地球层圈结构, 相变

Abstract High pressure physics investigates the state, structure, characteristics and changes of matter under high pressure. The Earth itself is a giant high pressure laboratory, since all matter in its interior is under high pressure. This article describes the application of the latest research results of high pressure physics to the study of phase transformations and characteristics of materials in the Earth's interior based on analysis of the Earth's layer structure and physical characteristics of its interior.

The close relationship between high pressure physics and earth sciences is stressed, as well as the current significance of developing border-line science.

Key words high pressure physics, earth science, earth layer structure, phase transformation

自公元前 600—200 年科学家确认地球是球形以来, 经历过地心说和日心说阶段以后, 在漫长岁月里, 人们竭力在探索宇宙和地球的真实模型。迄今浩瀚的太空和深沉的大地仍旧吸引着众多研究者的兴趣。

回顾地球科学的发展历程, 由于物理学、化学、数学、力学的应用, 学科之间的交叉促使地学迅速进入深层次的研究。采用地震波探测、地

磁地电反演等方法以后, 地球内部结构及其形成演化的历史才从大多数的臆测假说, 迈入以科学数据为基础建立各种模式的阶段。此外, 天体物理、天体化学的最新成就, 也从另一侧面拓宽了地学的研究领域。本世纪以来高压物理研究成果逐步应用于地球科学, 使原有模式逐渐

* 1994年11月17日收到初稿, 1995年4月24日收到修改稿。

趋于完善,基于地球各部就位测量的不可能性,决定了相当时期对地球的认识多限于地壳浅部.因此当人类飞向宇宙获得天体类地行星的新资料,当人们被彗木相撞的新现象所激励的时候,地球科学家们多么期盼着“地质火箭”能直接深入地球内部甚至地核,以窥视地球的奥秘.耗资巨大的超深钻,给予了人们一线希望,但深度毕竟还小.因此,目前采用间接方法,尤其从实验数据演绎来逼近,是一个十分重要和不可忽视的环节.高压物理是研究高压作用下或作用后物质状态、结构和性质及其变化规律的一门物理科学.作为一种典型的极端物理条件的高压,能够有效地改变物质的原子间距、原子壳层状态,改变元素的价态和性质,使物质产生在常压常温条件下所不具备的特殊新现象、新规律、新性能,并形成新的物质.地球本身就是个巨大的高压实验室,只是高压(高温)作用于地球物质的全部过程和全部规律尚未为人们所掌握,这正是高压物理大有作为之处.近代高压技术的发展,已提供了研究的可能条件,目前国际上已达到模拟核幔边界和地核的深度.

本文从已有研究成果入手,说明地球层圈结构、地球内部物相、物性和高压物理研究的密切关系,并适当引用类地行星对比资料,综合阐述高压物理研究在地球科学中的作用和重要意义.

1 地球模型的建立和物相组成

近代地球科学研究,经历了由表及里、由浅入深的质的飞跃,地球动力学的进展,迫切需要了解地球深部物质的组成和建立地球模型.综合近代研究成果,可将地球层圈结构模型归纳为广义层圈和狭义层圈两类.

1.1 广义地球层圈模式

包括固态地球、液态水圈和气态大气圈.地球与宇宙行星相似,外围被水圈和气圈重重包住^[1].对高压下水和冰的状态方程和相变,人们曾有过较多研究.目前,人类赖以生存的水和气

体在宇宙及地球的分布和行为,更是高压科学的热门课题.

1.1.1 水在地球表面的分布和状态

天文学家曾反演远古以前,地球表层全部由水、冰覆盖,迄今地球表面保留的海洋与陆地之比仍为 70% : 30%,在地球形成演化过程中,水占有微量增长重量的 2%,后期由于地外撞击的去气作用,水作为挥发份大量进入大气圈中. CO₂ 在 4.5 × 10⁹ 年中的地球去气过程中大量进入气圈,使地球表面富含 CO₂. 图 1 表示了以氧为例的循环规律.

水的分布状态在类地行星多以冰层出现并与高压关系密切.已知冰层分布于土星、木星的压力范围分别为 7—22 GPa, 36—66 GPa;天王星、海王星的冰层存在于压力高达 580—730 GPa 的范围.冰层包括水(H₂O)、冰层及混合冰层,后者含水(H₂O) 56.5%、甲烷(CH₄) 32.5%及氨(NH₃) 11.0%.冰的 XI 相金属化转变与氧的 d 电子缺失及 2p 价态的高压性状有关,它发生在极高压状态,压力已超过海王星核与冰层的边界压力^[2].

1.1.2 水在地球内部的分布和状态

地球深部小于 100km 范围(压力 3.1 GPa)内微量挥发份中含有 ≥ 0.1 H₂O 及接近于 0.01% 的 CO₂.最近研究成果认为,当压力小于 24 GPa 地幔含水形式主要以 (O₄H₄)⁻⁴ 形式替代硅氧四面体 (SiO₄)⁻⁴,例如上地幔主要组成矿物 Mg₂SiO₄ 可以成为含水相 [Mg₂(O₄H₄)],石榴石 Ca₃Al₂Si₃O₁₂ 则成为含水相 [Ca₃Al₂(O₄H₄)₃],认为这是在一定压力(温度)下,上地幔水的主要赋存状态,并且与岩浆海、过渡带成因有着密切关系.水在地球早期形成过程中,在高压下可与原有的铁进行反应.实验证明, (2+x)Fe + H₂O 生成 2FeH + Fe_xO, 在核幔分开过程中 Fe_xO 留在下地幔, FeH 下沉进入地核.地核中内核-外核边界压力为 330 GPa、温度为 4000—6000 K 时, FeH 含量可达 30—90 mol%^[2].

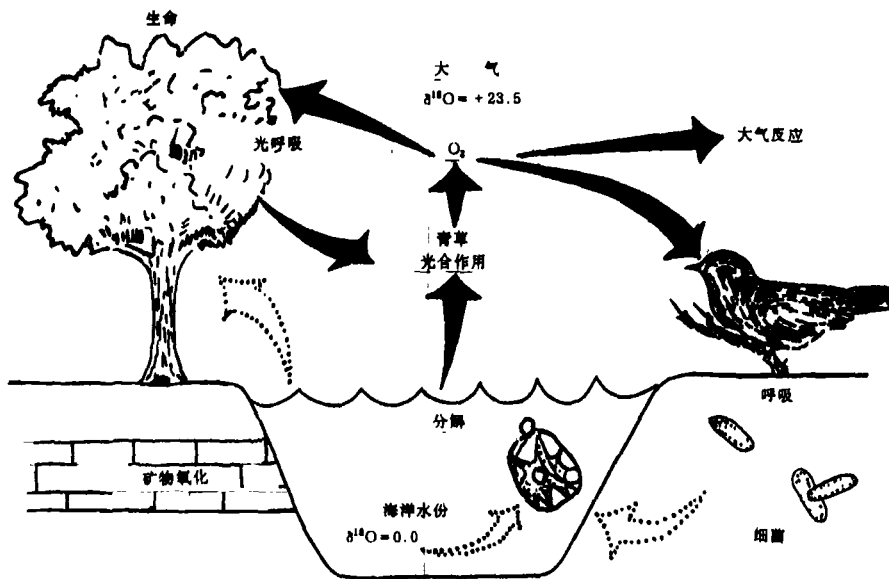


图1 水、氧和生命

1.2 狭义地球层圈模式——固态地球内部结构

整整四个世纪(16—20世纪)以来,科学家们一直在探索地球的真实模型.综合大量资料,可以将地球模型分为两个主要类型:(1)物理模型——建立在地震波探测和反演;物性测量和计算(如密度、压缩率等)以及物质组成相变三种数据基础之上;(2)化学模型——以元素、矿物、岩石的化学组成及其变化规律为基础.它又可细分为化学平衡/均匀增长模式、非均匀增长模式、通常石陨石模式、混合陨石型及

多组分混合型.本文将结合高压物理研究重点讨论物理模式.

1.2.1 地震波与地球内部结构——物理模式之一

地震波反射及走时测定是地球深部信息和定量数据的直接或间接来源.根据波速分布、间断和横波减弱至消失的特征,划分地球内部结构分层,详见表1.

表1 地球内部不同深度的压力和纵波波速(v_p)、横波波速(v_s)分布

深度分布 (km)	压力 (GPa)	v_p (km/s)	v_s (km/s)
地壳基底		7.2	
壳幔界面 (Moho) 33	0.9	7.76	4.36
震波低速带 (LVZ) 100—150	3.1—6.5	7.95	4.45
波速不连续面 (Lehman 间断) 220	10	8.42	4.60
过渡带 (TZ) 400	13—14	8.97	4.96
波速不连续面 670	25	10.25	5.66
波速不连续面 1000	39	11.42	6.36
核幔边界 (D'') 2900	137	13.64	7.30
外核-内核边界 5080	317	9.40	0
内核— 6371	364	11.31	

关于莫霍面 (Moho), 厚度约 3—5 km, 由高-低速薄层相互咬合随机分布所组成, 受后期岩浆侵入和地壳变质作用干扰, 形成非水平连续. 地渡带具有高电导率, 低 v_p 特征, 液态外核 v_p 略有降低, v_s 完全消失.

1.2.2 地球物理常数与地球内部结构——物理模式之二

根据密度、压缩率、刚度、弹性模量又将地球内部分为 A、B 两种模式, 用高压实验对上述常数测定后, 根据计算因子进行外推, 模式 A 包括密度与弹性, 模式 B 包括刚度和体模量, 数据误差 2—8%⁽³⁾. 如表 2 所示.

表 2 地球内部不同深度主要物性常数*

深度 (km)	压力 (GPa)	密度 (g/cm ³)	体模量 (GPa)	应力 (GPa)	杨氏模量	刚度 (GPa)	重力 (cm/s ²)
33	0.9	3.32	116	26.9	160	63	985
100—150	3.1—6.5	3.38	124	27.2	170	67	986
220	10	3.70	158	27.5	189	79	985
400	14	3.85	192	28.0	230	95	983
670	25	4.15	259	28.1	338	133	980
1000	39	4.53	348	27.6	482	178	976
2900	137	9.7	645	50	787	300	1069
5080	317	13.7	136			320	573
6371	364	12.3—18.1	164			500	

* 表中综合了 A、B 两种模式的数据, 由不同算法得出.

1.2.3 高压相变与地球内部结构——物理模式之三

三种物理模式的建立过程, 反映了高压物理研究应用于地球科学的发展历程. 由于地震波方法所得数据亟待解译, 为了深入掌握地球内部物质相变规律, 大量高压物理实验研究得以迅速开展. 近年来取得了可观的实验结果, 表明固体地球内部基本是以固态矿物结构相变为主, 但涉及到其他物态如非晶态、气态、金属态,

究竟以何种形式存在, 与地震波速是何关系等一系列问题尚不清楚. 有关相变机制的讨论仅属于启蒙阶段. 总之, 已有研究结果表明, 地球内部物质相变规律复杂, 存在着许多有待于高压物理研究解决的问题. 表 3 对岩石矿物相变模式进行了简单的结论性综述, 初步认为它可以与地震波间断相对应. 实际这些代表物质的实验结论包含着大量实验结果和不同数据的对比探讨, 尚处于多解近似状态⁽⁴⁾.

表 3 地球内部不同深度的物相组成

深度 (km)	压力 (GPa)	物 相 组 成
地壳内部	<0.9	各种岩石不同分布格局
33	0.9	橄榄石 (Mg ₂ SiO ₄), 石榴石 (Mg ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₂) 四配位
100—150	3.1—6.5	Mg ₂ SiO ₄ , Mg ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₂ 稳定或含 H ₂ O, 部分熔融软流体液态
220	10	斜方 Mg ₂ SiO ₄ → βMg ₂ SiO ₄ 亚稳相
400	14	斜方 Mg ₂ SiO ₄ → βMg ₂ SiO ₄ → γ 尖晶石相 Mg ₂ SiO ₄ (立方)
670	25	Mg ₂ SiO ₄ 后尖晶石相
1000	39	MgSiO ₃ , Mg ₂ SiO ₄ , Mg ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₂ 向钙钛矿相转变 SiO ₄ → SiO ₆ 六配位
2900	137	斜方 (假立方) 钙钛矿相硅酸盐 → 四方结构 → 密排六方结构 (立方结构?)
5080	317	氧化物四方结构 → 密排六方结构 → 立方结构 SiO ₆ 六配位
5080	317	FeH, FeS 液态外核界面
6371	364	固态 Fe (Si, O, S, H) 内核

2 高压凝聚态物理学与地球层圈结构

地球和类地行星初始成因复杂,因为它们长期处于运动状态,压力温度作用有时重复交错进行.物理模式提供的数据不仅具有多解近似性,而且物理机制不清,如何运用近代物理理论,深入研究分析实验结果,成为迫切需要解决的问题.综合相变规律表明,高压可以增加物质密度,增高结晶对称性,加大配位数,缩短原子间距和键长;高压导致晶格畸变,对结晶度和简化相数有显著影响;高压影响元素的容许因子,影响矿物类质同像代替,改变元素价态;高压导致晶体非晶化,非晶压致晶化,高压导致金属态的产生.上述原则与高压凝聚态物理学研究的内容十分符合,纯属其研究范畴⁽⁵⁾.当前凝聚态物理学已上升为物理学的热门基础学科.高压凝聚态物理学几乎渗透到绝大多数凝聚态物理学的前沿课题中.固体地球内部的物理问题实际上是一个复杂的高压凝聚态物理课题.现就有关的最新成就举例加以说明.

2.1 地球内部物质相变类型

2.1.1 固-固态相变

等温压缩下地球内部矿物通过晶格畸变时的离子位移或多面体旋转,所产生的固-固态相变无体积突变和相变潜热,应属二级相变范畴,两相摩尔体积变化在 $0 \sim < 3\%$ 的区间.但存在定压热容量、热膨胀系数和压缩系数的突变,已证实此类相变与震波波速间断可相对应.地球内部存在的另外一类固-固态相变,具有体积突变和相变潜热,在静水压、低剪切、高扩散条件下产生不相连的成核和生长过程,并受位错

和缺陷控制,高应力下出现马氏体生长机制,此类相变属一级相变.此时,高压导致了简化相数.高密度、高配位数、高结晶对称性和短键长的相得以择优生长.

2.1.2 固态-液态(含气态)相变

地球内部的低速层、软流圈是地壳运动、地幔对流等地球动力学研究的基本问题和控制因素.高压改变了常规物质的固液平衡界面;高压导致晶化物质非晶转化,从而带来一系列物理性质的变化;高压下配位数和价态的改变,大离子半径元素因随压力增高在晶格内的容许因子减小而脱出,形成新的聚合物.总之,上述高压现象是低速层、软流圈形成的重要原因.高压下硫和氢在铁中容许因子的变化导致的固液转化,是液态外核形成的根本条件,因此,这类高压凝聚态物理问题,虽属初期研究阶段,但值得深入探讨.

2.1.3 物质金属态相变

高压下冰的 XI 相为金属冰;氢在极高压下发生由分子金属氢到原子金属氢的转变;非金属铁镁氧化物在高压下合金化形成硅铁金属等,这些全新概念引进了地球科学,使地学家对许多地球内部问题开始重新思考.如地球内核是否存在硅铁合金,是否存在地球内部氢的热核聚变问题等等.

2.2 镁铁硅酸盐结构相变

镁铁硅酸盐是地幔的主相.高压实验证明,为顺应高密度、高结晶对称性、高配位数、小体积、大体弹模量的高压物理准则,随着压力增高,镁铁硅酸盐产生结构相变系列,从而将地球内部划分为层圈结构带.见表 4.

表 4 镁铁硅酸盐结构相变参数

结 构 相 变	密 度 ρ	对 称 性	配位数 (Si)	体 积 V_0	体弹模量 K_0
(220 km) $\beta\text{Mg}_2(\text{Fe})_2\text{SiO}_4$	3.70	四 方	4	40.51	173
(400 km) $\left\{ \begin{array}{l} \gamma\text{Mg}_2(\text{Fe})_2\text{SiO}_4 \\ (\text{PX})\text{Mg}(\text{Fe})\text{SiO}_3 \\ (\text{Gr})\text{Mg}(\text{Fe})\text{SiO}_3 \\ (\text{I})\text{Mg}(\text{Fe})\text{SiO}_3 \end{array} \right.$	3.85	立 方	4	39.53	183
				31.29	108
				28.58	154
				26.35	210
(670 km) $\text{Mg}(\text{Fe})\text{SiO}_3$ 钙钛矿相 SiO_2 石英	4.53 4.29	斜方 \rightarrow 立方 四方 \rightarrow 六方(立方)	6-8 6-8	24.44 14.01	247 314

* (PX)为辉石,(Gr)为石榴石.

2.3 钙钛矿相

最新研究认为下地幔主要由硅酸盐钙钛矿组成,包括 CaSiO_3 , MgSiO_3 , $(\text{Mg}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{SiO}_3$, 占地球总重量的 60%。钙钛矿结构硅酸盐在超高压下的稳定性,下地幔镁铁含量比,以及高密度氧化物,是地球深部高压物相研究的关键。而钙钛矿结构又是超导材料的基本结构,所以在材料领域有很高的重要性。上述所有内容均属高压凝聚态物理的研究热点。已有研究表明, MgSiO_3 , CaSiO_3 钙钛矿在高压下十分稳定。 MgSiO_3 的稳定压力范围为 30—40 GPa, CaSiO_3 自 11 GPa 到 130 GPa 无畸变出现。根据体弹模量、体积热膨胀系数测定, $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ 中的 Fe/Mg 比值,数值为 0.1 属上地幔范围, 0.2 属于下地幔范围。与钛酸盐钙钛矿 CaTiO_3 相比,钛酸盐钙钛矿随压力增高发生晶格畸变,由斜方变为正方结构,继续加压向六方密排转变。钛酸钡、钛酸锶都有各自不同的高压下的畸变规律,由此可见, $[\text{TiO}_6]$ 八面体简单链状基型,不如 $[\text{SiO}_6]$ 简单架状基型稳定^[6]。

2.4 二氧化硅相变

二氧化硅(SiO_2)组成了宇宙体积的 80%, 地球的物理和化学性质及热状态大部分被固态和液态 SiO_2 , SiO_3^{2-} 所控制, $\text{Si}-\text{O}$ 键是地球中最普通的化学键。 $\alpha\text{-SiO}_2$ 在 9 GPa 压力下转变为斯石英(st), 石英由三方结构转变为四方金红石结构。在 60 GPa 压力下,经非软模相变,变成立方黄铁矿结构(Pa3), 并可以稳定到 150 GPa。另有研究表明,它涉及到声子软模和弹性异常。在 80—100 GPa 时, SiO_2 斯石英转变为斜方 CaCl_2 结构。它是由于晶格活化到强烈异常体系, $[110]$ 方向达到极端软模条件,强烈弹性异常导致的晶格斜方化^[2]。高压诱导 SiO_2 非晶态出现在 25—30 GPa 压力区。无论压缩石英或柯石英,其非晶结构均出现明显的非晶态的拉曼谱特征。在 50 GPa 压力时, SiO_2 非晶出现压致晶化效应。

2.5 二氧化钛相变

由于高压下矿物晶格的稳定性是地球物理研究中的重要问题,与二氧化硅类似的二氧化

钛金红石结构,是下地幔的主要物相。已采用了量热法、金刚石压砧高压电导率测量和高压同步辐射原位测量三种方法进行对比实验^[6,10], 以求准确确定 TiO_2 相变对应的压力值。结果表明,三种方法所得 TiO_2 四方结构向 $\alpha\text{-PbO}_2$ 斜方结构相变压力十分接近,差值仅仅 0.1—0.6 GPa。量热法测得二氧化钛金红石结构向 $\alpha\text{-PbO}_2$ 斜方结构转变压力为 6 ± 2 GPa。高压电导率测量对应电导率拐点的 $\alpha\text{-PbO}_2$ 结构相变压力为 5.8—7.9 GPa。同步辐射原位测量得到的相变压力为 5.9—8.5 GPa^[7]。

2.6 关于地核

地核包含液态外核和固态内核,现有研究认为它们是由铁加某种轻元素组成。地核状态的确定过程,记录了不同时代、不同高压物理研究方法获得的结果。早期对地核的认识,只是处于假想和臆测。当时人们发现地球内部温度很高,可能在所有物质气化的临界温度以上,因而认为地球内核由气体分子组成。康德-拉普拉斯地球成因说提出,太阳、行星由旋转的星雾凝聚而成,原始地球应为液态,当液态渐渐冷凝时,表面固结为地壳,内部仍保持液态,推测出液态地幔、地核假说。比较科学地认识地核,起源于地震资料,以后发展到冲击波动高压物理实验,近年来静高压技术日趋完善,使认识逐渐深化。

2.6.1 地核的组成

由于地震资料和地磁的发现,确定地球是一个刚体。地磁场确认地核由铁所组成,最确切固体内核的证据,来自于地球自由震荡数据,内核范围达到 3.45 ± 0.1 km/s^[8]。

2.6.2 冲击波高压物理研究

由于地核处于极高压状态,相当长时间内非一般方法可以模拟。动态高压弥补了这一不足,并可根据雨贡纽方程往两端外推。动高压包括等熵压缩和冲击波压缩两种。在状态方程计算方面,尤有独到之处。由此可以通过计算得出地球内部特别是地核的热力学参数、压力、温度和体积之间的关系,从而得到声速和密度数据,用以确定地核状态。冲击波实验表明,内核的刚度比低压下关于铁及铁合金的数据要低得多,

物理

泊松比 ν 等于 0.44, 则较铁的低压数据要高. 采用金属的声速测定和雨贡纽方程计算, 研究了铝(固态)、钨(固态)、钽(液态)、铜-锌合金(液态)、 ϵ -Fe(液态)、钼(液态), 确定了密度、声速和上述金属随原子重量分布的斜率呈线性关系, 并且认为液态是最高压力态⁽²⁾. 此乃液态内核存在的又一佐证. 另外, 固态铁在高压下的状态研究结果表明, ϵ -Fe(hcp) 相稳定压力范围为 13—200 GPa; γ -Fe(fcc) 相或者 α -Fe(bcc) 相压力区间为 200—243 GPa, 二者尚未最后确定是否以混合相共存.

最近, 受木星的幔层含有氢和氦的混合物的启发, 进一步研究了氢-氦相平衡和非混性质问题, 推断地核是否是氢与氦混合, 抑或氢在地核高压下呈金属态等许多涉及到地球动力学的核幔边界现象, 亦有待冲击波高压物理去深入研究, 例如: 铁在高压下的电子态、磁化态、氧化态以及这些状态所表现出来的地球物理特性; 又如扩散、蠕变、热辐射、热传导如何影响着核幔边界热传递的本质和热的相互作用等⁽⁹⁾.

2.6.3 静态高压的研究

静态高压在研究地核方面又取得了新的成就, 从密度反演, 一直怀疑地核不仅由金属铁组成, 还应当含有轻元素. 最近根据不同轻元素的研究结果, 得到两种明显不同的观点. 主张硫化铁的学者认为, 高压下硫在铁中溶解量多少, 造成液态外核和固态内核分界. 轻硫化铁含硫量 15% (重量百分数), 得到的密度近于液态; 重硫化铁含硫量 2.6%, 得到第二种密度相当于固态, 形成了固液界面. 高压下氢化铁形成液固分界的支持者们认为, 氢在铁中的溶解度也是液态时较高, 高压下氢溶解于铁, 熔点降低了 600 K, 密度近于液态, 可作为氢化铁 (FeH) 液态外核的依据, 随着氢在铁中溶解度降低而固化, 形成内、外核固液界面. 因此, 高压凝聚态物理学的继续发展, 将会给地核、核幔边界研究提供更多信息, 亦将推动地球科学进一步发展.

3 高压物理与地球内部物性的研究

岩石矿物的物理性质以往多结合矿物的应

用和工程技术进行研究, 大多限于常规条件, 后来开展了高温下的测量. 高压技术的发展, 为高压(高温)下的物性研究开辟了广阔的前景, 取得了崭新的成果. 地球内部物质的物理特性, 是来自深部的重要信息, 从而高压下物性测量和研究成为高压物理应用于地球科学的另一重要领域, 目前主要是属于地球物理学研究范畴. 自布里奇曼 (Bridgman) 开拓性的研究高压技术以来, 它首先采用了金属电阻突变测量压力. 从 1931—1994 年 60 多年的历程中, 物质在高压下的弹性、电性、磁性、热性质, 以及物质在连续载荷形变下的电阻、声速和弹性波的振幅测量等新成就, 连续不断地被应用于地球科学中⁽¹⁰⁾. 由于涉及的内容广泛, 仅就最新动态扼要叙述如下.

3.1 高压下岩石的弹性

岩石是矿物的集合体. 岩石的弹性研究, 首先着重边界条件, 如不同形状、尺度, 不同矿物相的空间定位, 球形孔隙率的分布, 气体填充度的影响等等. 最新研究表明, 岩石中矿物的微观非均匀性, 矿物晶格的各向异性, 择优取向程度, 对岩石弹性影响很大, 因此, 进一步对弹性系数、纵向弹性波衰减、纵波横波的速度和在高压下的特征作了深入研究, 并强调指出弹性模量与岩石的微观结构之间存在着密切关系.

3.2 高压下物质的电性

金刚石压砧超高压下矿物的电导率测量, 是近年来发展起来的新技术, 它提供了物质在高压(高温)下电导率的变化信息, 并被用以研究地球内部的结构和相变.

此外, 在确立了岩石渗透率、孔隙率和电导率三者理论关系式的基础上, 进行高压实验测出电导率, 用以求出超低渗透率, 测量岩石在饱和水条件下的电性.

3.3 岩石的磁性

有一些地球科学家认为, 地球动力学的研究与地磁场起源关系密切, 目前除发动机原理外, 人们还在探索是否存在另外的地磁成因. 高压下研究矿物的霍尔效应、居里点的变化, 可提供地球物质在高压下的磁性特征. 古地磁研究

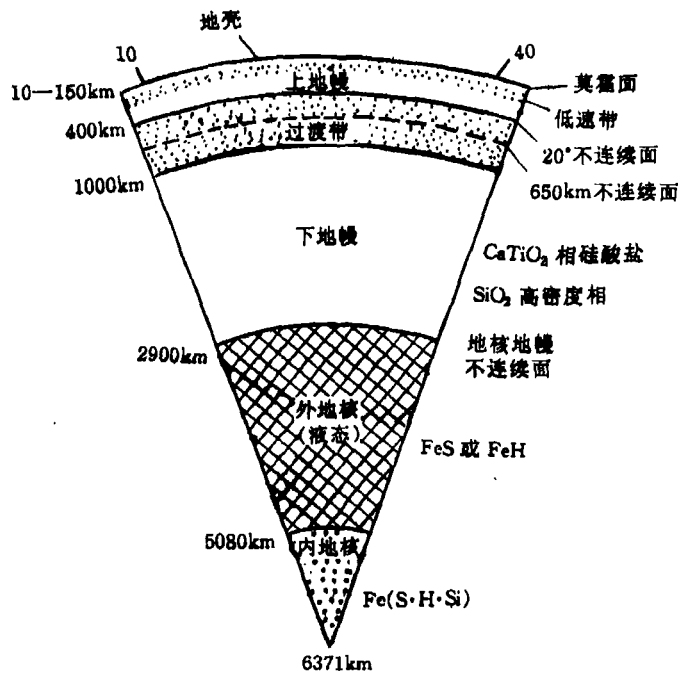


图2 地球内部物相与分层

是板块构造研究的一种根据,岩石在应力状态下或静水压下,剩余磁化率均下降,这种不同加压方式得到的相同结果,对研究古地磁具有实际意义。

3.4 高压下岩石的热性质

主要研究热导率测定和热传输机制. 高压(高温)下岩石热导变化具有明显规律,热导还决定于岩石阻挡层结构. 研究结果证明,热传导由声子和激子传导机制完成,岩石的热阻与声子和晶格的相互作用有关,热阻与声子之间的相互作用取决于压力和温度. 并推导了岩石密度与热传导及扩散系数的关系。

总之,地球物质的物性包括地磁、地电、弹性波、热导等的研究,已应用于地球科学的诸多方面,理论和实验测试都日趋完善,并由于地球科学研究的需要而发展迅速. 由于本文篇幅及侧重面所限,在此不再赘述。

致谢 本文承中国科学技术大学吴自勤教授积极推荐,并得到中国科学院物理研究所王积方研究员的热情帮助,谨致谢忱。

参 考 文 献

- [1] J. W. Head, C. A. Wood, *American Scientist*, 65-1 (1977), 21.
- [2] S. Yasuhiko, M. H. Manghnani, *High Pressure Research, Application to Earth Planetary Sciences*, Terra Scientific Publishing Company, (1992), 269.
- [3] G. C. Brown, A. E. Mussett, *The Inaccessible Earth*, Published by Chapman & Hall 2-6 Boundary Row, London, (1993), 18.
- [4] S. Akimoto, M. H. Manghnani, *High Pressure Research in Mineral Physics*, Center for Academic Publications Japan/Tokyo and D. Reidel Publishing Company/Dordrecht, Boston, London, (1987), 203.
- [5] 苏文辉等, 吉林大学自然科学学报, 9月特刊(物理), (1992), 170.
- [6] Xiong Dahe et al., *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 43, (1986), 244.
- [7] 熊大和等, 地球物理学报, 37-1(1994), 120.
- [8] S. G. Brush, *Equation of State Transaction*, American Geophysical Union, 63-47(1982), 1185.
- [9] J. A. Thomas, *地质地球化学*, 4(1988), 30.
- [10] W Schreyer, *High Pressure Researches in Geoscience* E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart-art, (1982), 223.