

·成果简介·

地球外核动力学性质研究

张毅刚

(中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

[关键词] 外核,液态铁,粘滞度

地球的外核处于地球 2 900—5 100 km 深度之间,处于液态。而从 5 100—6 371 km 处的内核为固态。

在整个地球演化过程中,地球外核起着极其重要的作用。首先,它是地球磁场的来源,通过外核液态铁的流体运动(Geodynamo),产生磁场。地球磁场与我们的日常生活密切相关,它能够保护我们不受宇宙带电粒子的侵袭,是进行航海的方向标。在建立板块构造学说过程中,地球磁场在大洋板块中留下的痕迹曾起了决定性作用。其次,地球内核的逐步冷却产生的热量,通过外核到达核幔边界造成核幔相互作用。近年来,核幔边界的研究成为热点,人们推测大洋板块下插后能够沉降到核幔边界(D''),地幔柱来源于核幔边界。因此,研究外核的动力学性质是认识整个地球演化的重要组成部分。

以下我们首先考察一下地球外核的物质组成和所处的温度压力状态,在此基础上,介绍有关外核所处的动力学状态方面的研究。

1 地球外核物质成分

地球外核的主要成分为铁。由于外核的密度比纯铁轻 10%,因此还必须考虑各种较轻元素的存在,如:O, S, C, Si 和 H。但外核以什么较轻元素为主却有较大的争议。

Williams 等人^[1]通过考察体积弹性模量和氧逸度,认为硅不可能是外核中最主要的轻元素。Allegre 等人^[2,3]则认为硅是最主要的轻元素。Li 等人^[4]实验研究表明,硫随压力增加变得更亲铁(siderophile),有可能是外核最主要的轻元素。Gessmann 等人^[5]的工作表明硅和氧均不可能是地核的主要轻元素。Okuchi^[6]认为如果初始地球的岩浆海

含水,95mol%的水将与铁作用,形成 FeH_x,这样 60%的密度缺口可以有氢的加入来弥补。

研究地核轻元素组成对认识地球形成和演化具有极其重要的意义。它与地球初始形成时的星子堆积模式(accretion model)和随后进行的岩浆海模式(magma ocean model)密切相关。本文认为,在研究外核的动力学状态时,除了考虑纯铁外,还需考虑所有其他元素的可能影响。

2 外核的温度和压力

对于地核压力的分布目前有较清晰的认识。一般认为核幔边界(Core Mantle Boundary, CMB)的压力为 135 Gpa(压力单位 1 Gpa = 10⁹ Pa = 10⁴ bar ≈ 10⁴ 大气压),而内核和外核边界(ICB)的压力为 330 Gpa。与此相反,对地核内部温度的分布却有较大的分歧。由于地球内外核处于液-固平衡,故主要工作集中在确定铁在 330 Gpa 下的熔化温度上。

Poirier 等人^[7]通过理论研究认为在 ICB 压力下纯铁的熔化温度约 6 000 K,考虑到轻元素的影响,认为 ICB 的温度约为 5 000 K。Yoo 等人^[8]通过实验得到在 330 Gpa 时,铁的熔化温度为(6 830 ± 500)K。Duffy 等人^[9]对这方面的工作做了总结。Belonoshko 等人^[10]的分子动力学计算得出的 ICB 温度超过 8 000 K。

对外核动力学性质的研究需要在以上的温度和压力区间来考虑。

3 外核动力学的状态

以上,我们考察了所要研究对象的成分及其所处的温度和压力的大致范围,在此基础上,可以开始研究外核的动力学性质。

本文于 1999 年 7 月 29 日收到。

外核处于不断的流动状态,动力学性质包括扩散系数、粘滞度、热导率、电导率等,其中最主要的动力学性质是粘滞度。粘滞度反映的是物质流动快慢方面的性质,主要有2种,即剪切粘滞度(shear viscosity)和体粘滞度(bulk viscosity)。剪切粘滞度是模拟外核地核发电机的基本参数^[11,12]。体粘滞度则主要应用于考察物质对地震波的吸收。

目前,地球外核粘滞度的具体数值存在很大的争议。Secco^[13]对前人的研究做了概要性总结。各种估计方法所得结果的差异达到 10^{14} 级。这些结果可以分为2种,一种是通过各种方法进行理论计算,另一种则是实际观测。

首先在剪切粘滞度方面,通过各种液态金属理论计算得出的值大约为 10^{-2} Pa·s^[14-16]。最近,De Wijs^[17]使用 first-principle 分子动力学方法计算了液态铁在外核条件下的剪切粘滞度。他们使用的方法是首先获得扩散系数,然后利用 Sutherland-Einstein 公式间接获得剪切粘滞度。得出的结果与上述利用各种液态金属理论得出的结果类似。Zhang 等人^[18]利用经验的 embedded-atom 势能进行了分子动力学计算。他们分别利用了 Sutherland-Einstein 和 Green-Kubo 两个公式计算剪切粘滞度。两种方法所得结果基本一致,也为 10^{-2} Pa·s 左右。

在25℃和1大气压下,水的粘滞度为 8.94×10^{-4} Pa·s,水银为 1.55×10^{-3} Pa·s,60%蔗糖+水为 5.65×10^{-2} Pa·s,甘油为0.5450 Pa·s,蓖麻油为1.0300 Pa·s。因此,外核的剪切粘滞度实际上很小,介于我们日常生活所熟悉的水和甘油之间。液态铁在外核温压条件下的粘滞度值也与它在常压下的粘滞度类似,如在1808 K和1 atm下其粘滞度为 6.92×10^{-2} Pa·s。

与此相对应的是实际地球观测所获得的剪切粘滞度值。从大地测量得到的外核剪切粘滞度值本事差别较大,从 10^{-2} 到 10^{10} Pa·s。这主要是由于这种方法观测时间长和未知吸收源的存在造成的。通过纵波衰减(p-wave attenuation)获得的粘滞度较为统一,约为 10^8 Pa·s。这种方法亦受诸如散射等因素的影响。

在地球外核温度和压力条件下实验直接测量液态铁的粘滞度现在技术上还达不到。为了使理论计算与实际观测能够统一起来,一些研究者提出了其他一些机制的存在。如Lumb等人^[19]试图用涡粘滞度(eddy viscosity)的存在来弥补上述差异。Nasch等人^[20]在常压下对Fe-Ni-S系统的实验研究表明S能

够使该系统的粘滞度到 10^7 Pa·s。但在外核温度和压力下该系统的行为是否仍然如此现在无法知道。近期的理论计算表明S对液态铁的粘滞度影响不大^[21],而O甚至会降低Fe-O系统的粘滞度^[22]。

研究流体流动与电磁场相互作用的学科叫做磁流体学(magnetohydrodynamics)。为研究地核发电机的具体过程,需要解一系列复杂的非线性偏微分方程。其中所要考虑的力包括科里奥利力、粘滞力和洛伦兹力。其中粘滞力和科里奥利力的相对重要性可以用Ekman数来表达。Ekman数的定义为 $\eta/(\rho\Omega L^2)$,其中 η 为粘滞度, ρ 为流体密度, Ω 为地球旋转速度, L 为流体厚度。通过计算表明在外核中相对于科里奥利力,粘滞力可以忽略不计。外核处于一种小尺度的循环和紊流状态,而不是大尺度的整体循环。外核液态铁较小的粘滞度还对进行地核发电机(geodynamo)的模拟造成了很大的麻烦。在处理边界条件时,小粘滞度需要较高的解析度,从而使计算时间大大提高。许多研究者正在进行这方面的努力以解决这一问题^[11,12]。

在体粘滞度方面,Anderson^[23]根据双态理论(two-state theory)估计外核的体粘滞度大约为10—1000 Pa·s。Zhang等人^[13]首次利用分子动力学方法计算了在外核温压条件下液态铁的体粘滞度,得出的结果为 10^{-3} — 10^{-4} Pa·s。这与Anderson的结果有很大的不同。Nasch等人^[24]对Fe-5%Ni-10%S系统的研究表明S不仅有效地增加系统的粘滞度,而且对体粘滞度的增加大于对剪切粘滞度的增加,所得纵粘滞度(longitudinal viscosity)中体粘滞度为主要部分。外核温压条件下轻元素对体粘滞度的影响目前还没有这方面的工作发表。

在纯液态铁的体粘滞度和剪切粘滞度值的相对大小方面,一般认为在常压下,体粘滞度和剪切粘滞度的值类似^[23,24]。Anderson认为外核条件下体粘滞度与剪切粘滞度之比为10—100。Zhang等人^[13]通过分子动力学却得出上述比值约为0.1,与前人的认识有较大的不同。

从以上对外核动力学性质研究现状的概要性介绍可以看出,对地球内部物质性质的研究是一门综合交叉性很强的学科,使用了物理、化学、数学、计算机等学科中的一些“重型武器”来解决地球科学中的一个非常重要问题。这些“重型武器”包括最先进的first-principles分子动力学、使用了超级计算机进行计算等等。这些艰苦的努力所获得的结果将对认识我们所居住的地球的形成和演化具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Williams Q, Knittle E. Constraints on core chemistry from the pressure dependence of the bulk modulus. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1997, **100**: 49—59.
- [2] Allegre C A, Poirier J P, Humler E. The composition of the Earth. *EPSL*, 1995, **134**: 515—526.
- [3] Sherman D M. The composition of the Earth's core: constraints on S and Si vs temperature. *EPSL*, 1997, **153**: 149—155.
- [4] Li J, Agee C B. Geochemistry of mantle-core differentiation at high pressure. *Nature*, 1996, **381**: 686—689.
- [5] Gessmann C K, Rubie D C. The effect of temperature on the partitioning of nickel, cobalt, manganese, chromium, and vanadium at 9 Gpa and constraints on formation of the Earth's core. *GCA*, 1998, **62**: 867—882.
- [6] Okuchi T. Hydrogen partitioning into molten iron at high pressure: Implications for the Earth's core. *Science*, 1997, **278**: 1781—1784.
- [7] Poirier J P, Shankland T J. Dislocation melting of iron and the temperature of the inner core boundary, revisited. *Geophys. J. Int.*, 1993, **115**: 147—151.
- [8] Yoo C S, Holmes N C, Ross M et al. Shock temperature and melting of iron at Earth core conditions. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**: 3931—3934.
- [9] Duffy T S, Hemley R J. Some like it hot: The temperature structure of the Earth. *Rev Geophys.*, 1995, Supplement, 5—9.
- [10] Belonoshko A B, Ahuja R. Embedded-atom molecular dynamic study of iron melting. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1997, **102**: 171—184.
- [11] Glatzmaier G A, Roberts P H. A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. *Nature*, 1995, **377**: 203—209.
- [12] Kuang W, Bloxham J. An Earth-like numerical dynamo model. *Nature*, 1997, **389**: 371—374.
- [13] Secco R A. Viscosity of the outer core. In: Ahrens T J, ed. *Mineral Physics and Crystallography, A Handbook of Physical Constants*. American Geophysical Union, Washington, DC, 1995, 218—226.
- [14] Gans R F. Viscosity of the Earth's core. *J Geophys Res.* 1972, **77** (2): 360—366.
- [15] Poirier J P. Transport properties of liquid metals and viscosity of the Earth's core. *Geophys. J.*, 1988, **92**: 99—105.
- [16] Svendsen B, Anderson W W, Ahrens T J. Ideal Fe-FeS, Fe-FeO phase relations and Earth's core. *Phys Earth Planet Inter.*, 1989, **55**: 154—186.
- [17] De Wijs G A, Kresse G, Vo adlo L et al. The viscosity of liquid iron at the physical conditions of the Earth's core. *Nature*, 1998, **392**: 805—807.
- [18] Zhang Y G, Guo G J, Nie G Z. A molecular dynamics study of bulk and shear viscosity of liquid iron using embedded-atom potential. *Phys. Chem. Mineral*, accepted.
- [19] Lumb L I, Aldridge K D. On viscosity estimates for the Earth's outer core and core-mantle coupling. *J Geomag Geoelectr.*, 1991, **43**: 93—110.
- [20] Nasch P M, Manghnani M H, Secco R A. Anomalous behavior of sound velocity and attenuation in liquid Fe-Ni-S. *Science*, 1997, **277**: 219—221.
- [21] Alfe D, Gillan M J. First principles simulations of liquid Fe-S under Earth's core conditions. *Cond-mat/9804035*, 1999.
- [22] Alfe D, Price G D, Gillan M J. Oxygen in the Earth's core: a first principles study. *Physics/9809036*, 1999.
- [23] Anderson D L. Bulk attenuation in the Earth and viscosity of the core. *Nature*, 1980, **285**: 204—207.
- [24] Nasch P M, Manghnani M H. Sound velocity measurements in liquid iron by ultrasonic interferometry. *J Geophys Res.*, 1994, **99** (B3): 4 285—4 291.

DYNAMIC PROPERTIES OF THE EARTH'S OUTER CORE

Zhang Yigang

(Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029)

Key words outer core, molten iron, viscosity