

·学科进展·

地核研究的新进展

陈晋阳 郑海飞 曾贻善

(北京大学地质学系,北京 100871)

[摘要] 综述了近年来对于地核对流运动的数学模拟计算所取得的进展,认为今后研究方向一要加强核幔边界的研究,二要对于模拟计算的理论和方法进一步的完善,尽量用与实际相近的各种条件来进行联合的反演计算模拟,从而进一步的完善和改进地核发电机模型,获得地核的更多认识。

[关键词] 地核,地核发电机,地磁场,地核对流

经历了很漫长的演化过程,地球才逐渐发展成目前这样的分层模式。现在的地核是早期融化的金属(主要是铁)形成的,地幔则是由分离出金属之后的硅酸盐和氧化物组成。地核内部呈固态,外部呈液态。液态外核的粘度与水相近^[1],随着地核的降温它会发生剧烈的对流运动,流速每年 10 km 左右。液态外核的运动,是地磁场产生和维持的基础,这种由外核运动产生地磁场的机理就称为发电机模型。

地球本身的自转使得外核流体运动加剧,磁场加强。由于地磁场对流体运动施加反馈作用,从而使得对地磁场的定量预测很困难。近年来通过数学模拟对于地核的认识已经取得了很大的进步,得到了能够自己维持运转的地核发电机模型^[2,3]。由于计算上的限制,这些模拟计算所用的条件与地核的真实情况还有一些差距,但是这些结果与观察到的许多现象还是比较相近的,由于外核的运动与地核的热状态是紧密相连的,所以这些进展也加深了对地球内部演化的认识^[4],本文将对近年来的研究进展作简单的评述。

1 地核的演化和热运动

地核在地球星云凝聚时就开始形成,由于星云的收缩凝聚产生的巨大热量,就使得地球大范围的、甚至全部的处于融化状态,融化的金属铁由于密度大,它就从周围的硅酸盐和氧化物中分离出来,沉降到地球的中心成为地核。在液态铁沉入到地心的过

程中要释放出很大的重力能,这些能量就使得地球的温度大大地升高,从而使得一些高熔点的金属如 Ni 和 Co 也处于融化状态,与液态铁一起沉入到地心^[5]。除了重力产生热量外,放射性 K 的同位素也可能是地核热量的一个主要来源,不过中等压力下的实验表明 K 在液态铁中的溶解度很小,这说明地核中的放射性⁴⁰K 的量很少,但是理论计算表明高压下 K 特性与过渡金属相似,如果这样的话它就可能在地球中大量的存在^[6],液态铁中钾的含量与很多因素相关,目前对于地核中的放射性热的认识还有待进一步研究。

地核中释放的热量是引起液态外核对流运动的重要因素,不过由于受地幔热对流的影响,地核的热传递很复杂。由于液态铁的导热系数很高,因而地核中的热量的传递就很快,不过在核幔边界上的热运动要受到外面范围更大传导缓慢的地幔热运动的控制,由于核幔边界的复杂性,使得地核热流的波动很大。一些新的计算结果表明地核中传递的热流量比最后流到地幔基底的热量,这说明地核中的热量并不是全部的传到了地幔,有一部分又混合到地核中去了^[7]。

地核组成不可能直接观察,主要是通过地震波所提供的资料来进行推测,地震资料表明,液态外核的密度比纯铁低 10% 左右,这意味着外核中肯定有一些轻元素存在,根据融化铁与硅酸盐地幔平衡的热力学的条件来推测,这些轻元素可能是 H、C、O、S

本文于 2000 年 11 月 1 日收到。

和 Si 等,但目前还不能确定。固体内核的密度与纯铁相差不大,最近通过对纯铁的高温高压理论计算的密度比地震波推测的结果大 2%—3%,这就说明除铁外,内核中也可能含有少量的轻元素。高温和高压液态铁理论计算的结果表明液态外核与固态内核的密度相差 30%,其主要是由于固化时体积收缩引起,当然也与外核中存在更多轻元素有关^[8,9]。地核的热运动也是与地核的演化紧密联系在一起,随着地核的不断降温,液态铁就不断的凝固,从而使得内核中铁不断增加、轻元素不断地向外排出。

2 地核对流与地磁场的产生

地磁场是认识地核对流运动的一个重要因素,它是由于液态外核的对流运动产生的,地磁场产生的这种机理通常就被称为地核发电机模型。由于欧姆损耗的作用,要使地磁场得以维持,就需要有一个连续的动力来源,否则在 1 万年里它就会被消耗掉,地核的对流运动给它提供了连续的动力。

由于地球的自转作用使得液态的外核发生一种沿着旋转轴的螺旋对流运动^[10],这种螺旋对流运动对于地磁场的作用称为 α 效应。另外由于热和元素的迁移产生一种带状对流运动,它对外核产生剪切作用力,这种带状对流对于地磁场的作用称为 ω 效应。地核发电机的动力情况就是根据地核的这两种对流运动确定的^[11],目前用得比较多的之一是 $\alpha\omega$ 模型,这是基于螺旋和带状两种运动的,另外一种是 α^2 模型,它则是完全基于螺旋运动来讨论的。

流体的运动与流体粘滞力和电磁力(罗伦兹力)有关,由于液态铁的粘度很小,所以粘滞力也很小,不过在小范围流动中,它也起很大作用,罗伦兹力只有在地磁场超过 10^{-3}T 时才会起主要作用。由于这两种作用力的不同就得到了不同类型的对流模式,当地磁场小于 10^{-3}T 时,就是粘滞力起主要作用了,这时只发生小范围的对流,称之为弱场模式,当地磁场超过 10^{-3}T 时,就是罗伦兹力起主导作用了,就会发生大范围的对流运动,这种模式就是强场模式。弱场模式发电机在剧烈的对流运动中很不稳定,这样的话它就很可能转到强场模式下运行,不过在强场模式下发电机是否稳定与磁场的形状密切相关。地核发电机就是在这两种模式下转换,转换时间为 3 万到 10 万年,目前它很可能是在弱场模式下运转的^[12]。

在进行地核对流运动的计算时对于流体的惯性力和粘滞力考虑很少,不是完全忽略就是对它们进

行近似,不过如果真正考虑它的话,目前的计算水平还不行。这两种力比科里奥利力(地球自转偏向力)来说很小,粘滞力相对与科里奥利力的系数 E ,其数量级为 10^{-15} ,考虑到地核湍流的影响,其依然很小,数量级也只在 $E \approx 10^{-9}$;惯性力相对于科里奥利力的系数 Ro 也很小,以每年流体流动距离 10 km 算,它只在 10^{-7} 数量级。在计算中如果完全忽略这两种力的结果与实际差别很大。

过去几年里通过对流体的惯性力和粘滞力进行合理的近似,在计算中已经得到了地核发电机自维持的模式,并且这些结果与观察到的实际的地磁场比较相似。

Glatzmaier 和 Roberts 的计算方法是使粘滞力和惯性力尽可能小。他们最初计算以 $Ro = 0, E = 2 \times 10^{-6}$,结果得到了强场模式。其后的计算把流体运动主要局限在包围内核的圆筒内(即正切圆筒),这样就只考虑沿轴线的惯性力,圆筒内的流体运动由带状运动和螺旋运动组成,沿旋转轴上升的对流在核幔边界处分开,这些计算显示内核以相对地幔每年 2° 左右的速度旋转^[13]。

Kuang 和 Bloxham 采用另一种计算模式,也是只考虑轴对称部分的惯性力,不过他们以无应力的边界条件来减少粘滞力的影响,只是在内部考虑粘滞力,把螺旋运动和带状运动相结合(即 $\alpha\omega$ 模型),以 $Ro = E = 2 \times 10^{-5}$ 来进行计算,结果在核幔边界处获得了一个双极的地磁场。他们的这种模式中,最剧烈的动力运动发生在正切圆筒的边界处,这与上面 Glatzmaier 和 Roberts 的结果相反,他们得出的最剧烈运动在圆筒的中心。这种差别主要是由于他们对粘滞力的选取不同造成的,这就说明核幔边界处粘滞力的作用很大,在计算中不容忽略的。

这些计算模式都考虑了正切圆筒柱状对流,不过地磁场主要是由螺旋运动产生(α^2)的,带状运动的贡献很小,最后的结果都得到了在核幔边界两极组成的地磁场^[14]。在高纬度地区有一些地方的地磁场很强,这可能是合流运动的结果,在两极地区的场强很弱,这是由于分流运动造成的,这些结果与所保存的早期地磁场的起源的证据是一致的。虽然这些模拟计算与地球的实际情况还有差距,但是其结果与目前所观察到的许多现象还是比较接近的。

3 存在的问题以及今后的研究方向

3.1 存在的问题

目前地核中还有很多观察到的现象无法解决。

首先是地震波所显示出的内核弹性的各向异性问题,这个问题早在15年前就发现了,当时发现地震波沿赤道的传播要比两极慢,随着后来收集到的资料越来越多,就发现它越来越复杂。在内核的 10^3m 到 10^6m 范围内弹性存在着三维的不均一性,可是到了内核最外面的几百公里处这些不均一性很弱甚至不存在了^[15]。现在比较很多的看法认为这可能是由晶体的排列引起的^[16],目前对于高温高压下铁的结晶和弹性特征研究比较多,也提出了很多的机制,但是还没有一个找到完全令人满意的答案,更好地解释弹性各向异性的问题无疑会使人们对于地核的演化获得一些新的认识。

另一个问题就是地核相对于地幔旋转的问题,地核相对于地幔有一个小小的旋转,这一结论是基于过去30年里地震波的对称性变化得出的。为了解释这个现象,最初以对称轴与自转轴倾斜的圆筒模型计算得出,地核比地幔旋转每年要快 1° 到 3° ^[17]。其后采用弹性梯度陡峭的区域模型计算得出了每年的差别只有 0.2° 到 0.3° ^[18]。不过最近通过传播时间差测量却没有得到发现它们的自转存在差别,这可能是由于内核和地幔之间的重力相互作用阻止了它们的相对运动,也可能是由于相对运动太慢,以至于目前还不能够检测出来。这个问题也是现阶段急需解决的问题。

3.2 今后的发展方向

近年来的研究表明,核幔边界区可能是地球内部化学活动性最强烈的地区,在这里可能存在着核幔之间的化学反应。由于该区是核流区的上界线,又是地幔对流的下界线,在这里进行的化学反应和热量的传递在地球物质迁移演化中的作用、以及它与地幔对流、核面对流之间的关系是认识地球演化和地球动力学的重要问题。对于它的认识首先要加强地震学的观测,对核幔边界不均匀性的强度、幅度的变化以及在半径方向厚度的变化进行更加深入的认识,同时还要与大地测量学和地磁学等其他的地球物理和实验岩石学方面的观察资料,以及高压矿物物理学和实验岩石学方面的结果进行相互校正,从而获得核幔边界温度分布的准确信息,最终获得核幔体系在地球动力学和演化过程中的作用和物质运动的信息。

对于地球内部结构和动力学过程的认识,大多是依赖于地球表面所观察到的各种资料,通过初始模型进行数学反演计算来进行的。计算上的进步无疑会得到地核对流和磁场的关系的更好结果,近些

年来,由于在计算中广泛地应用了信息论、线性及非线性规划、广义逆理论、最优化方法以及模糊数学、小波变换、统计预测和混沌理论与分数维概念等一系列数学成就,使得理论与方法有很大的进步。在计算中除了要充分运用这些先进的理论方法外,高分辨信息的提取和更广泛的综合数据库的运用也是一个很关键的问题。在计算上所用到高斯射线、多维波动方程、非线性波动方程、矢量波动方程、高维波动方程与地核中观察到的地震波和磁场相结合,再加上一些高温高压的岩石学的实验数据来进行联合反演计算。这种联合反演计算模型的难度是很大的,今后还需要在理论上、方法上和效果上不断研究和深化。

对于地核的认识除了计算上的进步外,还需要进一步的加深对地核湍流及其影响的认识,由于湍流作用大大的改变着流体的粘滞性,而外核流体的粘滞性在计算中又是一个不容忽视的因素。目前计算中大多是采用的各向同性的扩散湍流模型,这种模型与地球的实际情况存在很大的差别,这是因为在实际地球中由于自转和地磁场的作用使得内核的湍流成为各向异性,这也有待于流体理论的发展和流体运动实验数据的积累。

地核发电机模型是解释地磁场的关键,并且它也是研究地核和地球其他部分相互作用的基础,其中地核与地幔的热相互作用是最主要的,通过核幔边界的热流影响着地核的对流和内核的增长率,这些作用也会反映到地磁场上,对于它们认识的加深,不仅会对古地磁记录和地震现象作出很好的解释,更重要的是大大的加深对于整个地球的组成和演化的认识。

参 考 文 献

- [1] de Wijs G A et al. The viscosity of liquid iron at the physical conditions of the earth's core. *Nature*, 1998, **392**:805.
- [2] Glatzmaier G A, Roberts P H. A three-dimension convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1995, **91**:63.
- [3] Kuang W, Bloxham J. An earth-like numerical dynamo model. *Nature*, 1997, **389**: 371.
- [4] Stevenson D J. Planetary science-A space odyssey. *Science*, 2000, **287**: 997.
- [5] Tschauerer O. Partitioning of nickel and cobalt bet silicate perovskite and metal at pressures to 80 Gpa. *Nature*, 1999, **398**: 604.
- [6] Parker L J, Atou T, Badding J V. Transition element-like chemistry for potassium under pressure. *Science*, 1996, **273**:95.
- [7] Labrosse S, Poirier J P, Lemouel J L. On cooling of the earth's core.

- Phys. Earth Planet. Inter., 1997, **99**:1.
- [8] Stixrude L, Wasserman E, Cohen R E. Composition and temperature of Earth's inner core. J. Geophys. Res., 1997, **102**:24 729.
- [9] Laio A. Physics of iron at earth's core conditions. Science, 2000, **287**:1 027.
- [10] Olson P, Glatzmaier G A. Magnetoconvection in a rotating spherical shell; structure of flow in the outer core. Phys. Earth Planet. Inter., 1995, **92**:109.
- [11] Hollerbach R. On the theory of the geodynamo. Phys. Earth Planet. Inter., 1996, **98**:163.
- [12] Langereis C G. Magnetostratigraphy and astronomical calibration of the last 1.1 Myr from an eastern Mediterranean piston core and dating of short events in the Brunhes. Geophys. J. Int., 1997, **129**:75.
- [13] Glatzmaier G A, Roberts P H. Rotation and Magnetism of earth's inner core. Science, 1996, **274**:1 887.
- [14] Christensen U, Olson P, Glatzmaier G A. A dynamo model interpretation of geomagnetic field structure. Geophys. Res. Lett., 1998, **25**:1 565.
- [15] Mesweeey T J, Creager K C, Merrill R T. Depth extent of inner-core seismic anisotropy and implications for geomagnetism. Phys. Earth Planet. Inter., 1997, **101**:131.
- [16] Stixrude L, Cohen R E. High-pressure elasticity of iron and anisotropy of earth's inner core. Science, 1995, **267**:1 972.
- [17] Song X D, Richards P G. Seismological evidence for differential rotation of the earth's inner core. Nature, 1996, **382**:221.
- [18] Creager K C. Inner core rotation rate from small-scale heterogeneity and time-varying travel time. Science, 1997, **278**:1 287.

THE DEVELOPMENT OF NEW RESEARCH IN EARTH' CORE

Chen Jinyang Zheng Haifei Zeng Yishan

(Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The heat of Earth's core is more and more recognized these days with the development of science and technology. The geodynamo is a key to understand the origin and evolution of the core and the geomagnetism. Numerical simulations achieve a self-sustaining magnetic field. Thermal convection and compositional convection account for the operation of the geodynamo. There shall have more investigation in the heat of core - mantle boundary and improvements in the mechanism of geodynamo in order know more about the core.

Key words core of Earth, geodynamo, geomagnetism, convection of Earth' core

·资料·信息·

中外专家共同研讨组合化学研究方向

由国家自然科学基金委员会化学科学部和生命科学部主办,中国科学院上海药物研究所、国家新药研究重点实验室承办的 2000 中国组合化学研讨会于 11 月 15—17 日在上海举行。基金委化学科学部张礼和主任、唐晋副主任,黄量、赵玉芬、陈凯先 3 位院士,美国、英国、法国、日本、澳大利亚等国的知名教授、学者,史克必成、默克、武田、罗氏等著名制药集团和 IRORI、Mimotopes、Pharmacopeia 等组合化学公司的高级专家以及国内从事组合化学相关领域研究的代表近 130 人参加了研讨会。

本次研讨会是我国第一次全国性组合化学领域专家的聚会,同时为加强该领域的国际交流打开了窗口。与会代表就组合化学虚拟库、基于生物大分子结构和药物作用机理的计算机辅助组合化学库设计、组合化学库的设计和合成策略、固相合成反应、

组合拆分、生物组合化学及高通量筛选等研究成果进行了交流。

与会代表认为,组合化学是 20 世纪 90 年代有机化学领域中的一场革命,为药物化学及其他领域中的研究工作者引进了创新性的科学思维,推动了相关学科和产业的快速发展。值此世纪之交,在我国召开组合化学研讨会非常及时、必要。本次研讨会涉及面较宽,报告内容水平较高,深深吸引了正在从事和关心组合化学研究和发展的工作者。代表们就组合化学领域中普遍关心的问题进行了研讨、切磋、交流,一致认为应结合我国国情,跟踪国际前沿发展,加强学科交叉,增强创新能力,进一步开展组合化学研究,逐步开拓组合化学的新领域。

(化学科学部 杜灿屏 生命科学部 吴镛 供稿)