

· 学科发展 ·

地磁学与地球内部过程

朱日祥*

(中国科学院地球物理研究所, 北京 100101)

[摘要] 有关地球磁场极性倒转周期、稳定的地磁极性间隔、极性倒转过程的持续时间以及快速倒转等现象的时间尺度与地球内部物理化学过程之间的相关性, 是当代地球科学的前沿课题之一; 地球磁场起源理论研究则是古老而富有挑战的科学难题; 研究地球内部的结构、物质组成和物理化学特征及动力学过程是认识社会持续发展过程中的资源、环境与灾害三大主题的重要途径。本文对上述领域的研究成果进行了总结分析, 并提出了自己的看法。

[关键词] 地磁学, 地磁极性倒转, 地球内部过程

1 引言

地球是人类赖以生存和活动的空间环境, 而地球内部蕴藏着人类社会发展和繁荣所需要的各种物质资源, 同时也是各种灾害和影响大地变迁的策源地。地球内部物质运动过程制约着地球各圈层的耦合和物质与能量的交换, 包括岩石圈, 大气圈, 水圈和生物圈以及地球内部各圈层。在它周围发生的各种物理现象都是相互联系, 相互依赖, 相互制约, 相互作用的。许多重大的地学问题都应当从发展和系统的观点去研究, 才能取得突破性的进展。地磁场是地球表面最主要的物理场之一, 其变化特征既反映地球内部流体运动的不同状态, 又与太阳活动等外部因素有关。因此, 电磁空间环境是地球系统和全球变化研究的重要内容之一。

2 地磁极性倒转与地球深部过程

有关地磁极性倒转现象是在本世纪初发现的^[1,2], 但直到 60 年代的地学革命, 才使这一研究得以发展, 建立了 1.65 亿年以来较为详细和准确的地磁极性年表。随着研究的深入, 极性转换期间地球磁场形态学成为当代地磁学科的前沿课题, 特别是转换场时空变化特征与地球内部过程的关系是地球科学家关注的热点之一。发电机理论研究表明, 地核内流体的运动可产生正负极性的磁场, 但从理论上计算地球磁场如何改变其方向则是非常艰难的问题。实际观测揭示了地球磁场在几百年范围内就会发生很大的变化, 并有可能发展成为极性倒转^[3]。因此, 借助于相对比较完善的地磁长期变化理论可以加深我们对地磁极性倒转的认识; 对倒转周期为 11 年的太阳磁场的研究, 为我们认识地磁极性倒转提供了另一途径。另一方面, 古地磁学研究表明: 地磁极性倒转的周期约为 1000 万年^[4]; 稳定的地磁极性间隔约为 10 万

本文于 1995 年 4 月 6 日收到。

* 1994 年度“国家杰出青年科学基金”获得者。

年^[5]；极性倒转过程与地球磁场方向变化相联系的持续时间约几千年^[6]，在此期间地球磁场强度减弱到极性稳定期间的20%—30%。由于极性转换的持续时间比极性稳定的时间要短得多，这就给古地磁学研究带来更大的困难，并需要我们提供大量的数据来确定转换场的形态。一些研究者认为，极性转换期间虚地磁极(VGP)的分布是随机的，所谓优先分布经度带是由沉积剩磁的平均效应和采样点分布的不均匀性(现有的采样点主要位于西欧和北美)引起的，而实际的转换场并非如此简单。由熔岩流测定的转换场VGP不存在剩余磁性的平均效应，但能记录转换场的熔岩流是非常少的，而且缺乏较准确的定年手段，因而很难由熔岩流的剩磁提供转换场的较完整信息。Hoffman(1991)根据由熔岩流得出的结果研究了转换场VGP的分布特征^[7]。最近，McFadden等(1993)利用特殊的统计方法^[8]，证实了现已获得的极性转换期间虚地磁极确实存在优先分布经度带。但他们所利用的采样点的经度大多数与环太平洋分布的虚地磁极经度差是90度。Egbert(1992)根据现代地球磁场的分析认为^[9]：虚地磁极与采样点经度差为90度是地磁非偶极子场的固有特征。因此，为了进一步认识极性转换期间虚地磁极的分布特征及其与地球内部其它物理现象的可能相关性，在环太平洋区域选择适用研究极性转换期间地球磁场形态的剖面是非常重要的。近年来，我们利用中国黄土沉积物和火山熔岩流对极性转换期间地球磁场时空分布特征进行了较为深入系统的实验和理论研究，发现一个完整的极性转换过程是由多次快速倒转构成，每次快速倒转经历的时间约几百年^[6]，而不是过去人们普遍认为的几千年。在这些实验结果的基础上，提出地球磁场从正极性到负极性或从负极性到正极性的快速倒转在时间分布上随机性的新观点，并进一步确定了极性转换期间地磁极主要环太平洋分布，与采样点位置以及倒转方向无关。同时，理论地球物理研究表明，地核内流体的运动在太平洋区域为低速区，地震P-波在下地幔的传播速度在环太平洋区域为高速区(低温区)。据此，我们提出地球磁场倒转不仅受控于地核内流体运动状态的变化，而且与下地幔的结构有关。从这一新观点可以引伸出两个与过去传统观念不同的推论：其一，在极性转换期间地球磁场仍以偶极场为主；其二，用地球磁场在地表的分布状态可以反演地球深部的动力学过程。值得注意的是，Gubbins和Coe(1993)从理论上证明^[10]，非偶极子场同样可以产生环太平洋分布的虚地磁极。因此，极性转换期间地球磁场究竟是以偶极子场还是非偶极子场为主，仍是地球科学家致力于深入研究的关键问题之一。

古地磁学的这些研究成果对发电机理论是非常有用的，但迄今综合古地磁学和发电机理论的研究报道极少，如何将理论与观测结果有机地结合起来，是我们应该认真研究的首要问题。比如，极性转换过程中快速倒转的不对称性究竟是发电机过程的固有特征还是地壳产生的剩磁引起的异常？以及极性转换期间的快速倒转经历的时间尺度是如此的短，以致很难用地核内流体运动方向的变化来解释这一观测现象。根据地震学和矿物物理研究结果，核幔界面是一个热学、力学、化学以及电磁学相互作用的很复杂的区域。地核中处于熔态的Fe可能与地幔中的硅酸盐反应，形成物质结构和物理化学特征都极为复杂的D'层^[11]。它的特点是上界面的起伏很大，且有明显的横向不均匀性。一些学者认为，地幔柱是从D'层上升到岩石圈底部，然后在那里出现岩浆上升现象，在地面形成热点^[12]。发生在D'层的热和化学作用，影响着地幔对流、地幔柱的形成和长期变化、地磁极性倒转、核-幔角动量的交换、重力长波的变化以及地球化学演化。了解外核与下地幔过渡带的热和化学结构，对于研究发生在其周围的动力学过程是很重要的。我们认为，D'层的化学变化导致了D'层内铁的富集，并使其内

电导率显著增加(约 10^4 Sm^{-1})。正是这种高导层产生的对流,引起极性转换期间地球磁场方向的快速变化(时间尺度可达 100 年)和地磁漂移现象的发生。这个问题具有重要的理论意义,是推动发电机理论研究的关键点之一。

Hide (1967) 首先研究了核-幔相互作用对地核运动和地磁场的影响^[13]。他考虑了三种最基本的耦合机制:(1) 形态耦合 (Topographic coupling)。它起源于克里奥力力,其作用是使流体运动速度出现沿旋转轴的梯度变化,这就是最著名的 Proudman-Taylor 定理。核幔边界 (CMB) 的 Bumps 会使沿旋转轴的梯度变化增加。因此,这种耦合与地核内流体运动密切相关;(2) 电磁耦合。它要求下地幔下部的电导率 (σ_m) 是有限值。如果在下地幔下部存在一个厚度约 300 km 的特殊区域,在其内 σ_m 约 10^3 Sm^{-1} ,那么就足以解释日长的变化。但是为了解释大尺度现象,就要求 σ_m 更高些,而富含铁的 D'层可能会满足这一要求;(3) 热耦合。它起源于核-幔流动性的不同。地核内流体运动为地幔对流提供了一个等温的下边界条件。因此,从地核到地幔的热流存在横向变化(因为我们不能在一个对流系统的边界上既给定温度又给定热流),地核内流体运动的输热过程可以补偿地幔对 CMB 施加的横向变化。此外, Schloessin 和 Jadcobs (1980) 研究了核-幔之间的化学相互利用^[14]。这些耦合机制产生的影响是相似的,要区分它们是极为困难的。最近,地球磁场长期变化研究为核-幔边界相互作用提供了重要的证据,即地表磁场的变化与核-幔边界流体运动状态之间存在着很好的相关性,如:美国西海岸附近地磁长期变化的稳定区,南大西洋和印度洋区域地磁长期变化的活跃区,都与 CMB 流体运动状态密切相关。基于对现代地磁场的反演结果,地磁长期变化主要起因于 D'层和地球外核表面流体的运动状态。根据地球磁场变化特征(有些现象在几百年一直保持不变,而有的地磁特征则快速变化)与下地幔速度不均匀性的对应关系,我们认为地幔通过热耦合过程来控制外核内流体的运动,进而影响地球磁场的变化。

地磁极性倒转与核幔边界流体运动和下地幔结构的相关性,以及地磁长期变化与 D'层结构变化的联系,促进了地磁理论研究,同时也为地球内部结构和物质组成提供了独立的研究途径。

极性转换期间地球磁场的时空分布特征与其处于极性稳定期间有很大的差异,这种差异可能会引起到达地球表面某些放射性元素相对含量的变化。反过来,利用某些放射性元素相对含量的变化特征也可能预测转换场的变化规律。基于对现代地球磁场与宇宙射线关系的初步分析^[15],我们认为,极性转换期间地球磁场的异常变化势必影响到地球表面宇宙射线通量的大小,这是很有意义的理论问题,也是未来应致力开拓的研究领域。

3 地磁起源和西向漂移

地磁起源理论主要基于在 Boussinesq 和磁流体动力学近似下,由球对称的热源和边界温度驱动的对流引起的发电机过程在压缩效应和密度变化可忽略时, Boussinesq 近似在地核内的对流是成立的。磁场 \mathbf{B} 服从磁感应方程:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \lambda \nabla^2 \mathbf{B} \quad (1)$$

上式 \mathbf{V} 是流体运行速度, λ 是磁扩散系数。

动量方程为:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} = -\alpha_T \Phi \mathbf{g} - \nabla P + \frac{1}{\rho} \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

$\boldsymbol{\Omega}$ 是旋转矢量, Φ 起源于传导状态的温度扰动; \mathbf{g} 重力加速度, 方向指向地心, P 是动压力, ρ 是密度, \mathbf{J} 是电流密度矢量, ν 是运动粘性系数, α_T 是热膨胀系数。

热方程为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \Phi = \beta(r) + \kappa \nabla^2 \Phi \quad (3)$$

上式 κ 是热扩散系数, $\beta(r)$ 是强迫径向温度梯度。

对于地核内的流体运动, 非线性主要起因于感应项 $\nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B})$, 洛伦兹力 $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ 的热对流项 $\mathbf{V} \cdot \nabla \Phi$ 。感应项维持发电机过程, 洛伦兹力控制处于平衡状态下的磁场强度(负反馈作用)。因此, 在求解磁流体力学方程时这两项是绝对不能忽略的。很明显, 上述方程组允许有 \mathbf{B} 和 $-\mathbf{B}$ 的解, 同时稳定的正负极性应具对称性。但是古地磁研究表明, 稳定的正负极性并不具有对称性, 这意味着地磁极性倒转可能局部发生或现有理论存在某些缺陷。如果我们把地磁极性倒转看作是地磁场较大振荡的一部分, 那么对地球磁场长期变化的研究就有可能阐明地磁极性倒转过程。

如何用地球磁场西向漂移来解释地幔形态, 是地球科学家关注的另一问题。Bloxham 和 Gubbins (1985) 根据地球磁场长期变化的实际记录讨论了地核表面磁场的结构^[16]。他们指出, 核面磁场结构的许多特性与地幔异常相联系, 最显著的是位于太平洋的低长期变化区域被俯冲带环绕。大多数理论研究表明, 地核内流体运动西向漂移在这个俯冲带的东边缘停止^[17]。值得注意的是, 人类对地磁场的实际记录时间太短了, 不能由此得出地幔活动的重要信息, 过去几百年地磁场的变化可能仅反应了发电机瞬态过程, 而与其边界条件无关。因此, 必须借助于古地磁学来延拓我们对地磁长期变化的认识。Gubbins 和 Bloxham (1987) 指出^[18], 地球磁场长期变化是由外核表面流体的运动引起的, 而这种表面流是由地幔热通量的变化驱动的; 同时, 这种表面流破坏了准静态发电机产生的场, 并引起了地球磁场相对快速的变化。由于准静态的发电机过程产生关于赤道平面对称的磁场, 因此任何关于赤道平面对称的场都是由核-幔边界相互作用产生的。

基于地磁场西向漂移速率, 可以推断出地核内流体运动的周期约为 1 万年, 比地磁极性稳定周期短得多。如果假定磁力线是“冻结”在流体上, 那么在忽略电子扩散效应的情况下, 就可以用地磁长期变化来探讨地核内流体的运动。但是, 在研究地磁极性倒转时, 由于磁场的变化很大, 这时的“冻结”假设是不成立的, 而且电子扩散效应实际上也是不可忽略的。

4 地磁倒转频率与地幔对流

地磁极性倒转频率的变化与地幔对流时间尺度的一致性, 可能起因于地幔热通量的变化和横向往变化引起的核-幔边界不稳定性。迄今, 人们对这些问题还缺乏认识, 前者涉及到地球总热能的平衡问题, 而后者与下地幔对流有关。目前有两种观点: 其一是全球热通量的变化驱动发电机过程, 这一过程又会改变倒转和稳定之间的动力学体系; 其二是下地幔下部结构的变化导致产生倒转的不稳定因素的出现。McFadden 和 Merrill (1986) 研究了全地幔的热通量及其如何影响地磁倒转的行为^[19]。Loper 和 McCartney (1986) 认为^[20], D'层的温度梯度决

定着从地核到地幔的热流通量,而D'层内的绝对温度高低并不重要。在地核表面条件下,D'层的不稳定性将导致地球磁场的快速变化。从地核到地幔热通量的变化具有周期性,从而导致地磁极性倒转也具有一定的周期性。而Larson和Olson(1991)则讨论了地磁极性倒转活跃期与平静期的差别^[21],认为超静磁带与大地幔柱和强地磁活动相伴随。Jacobs(1981)指出,地磁极性倒转频率较低的时代与低地幔热通量相关^[22]。Jacobs(1981),Larson和Olson(1991)对稳定的发电机过程(不发生倒转)都要求地幔的高热通量。他们的观点得到 α^2 发电机模型的支持^[23]。基于上述研究结果,我们认为,起因于地幔对流的热通量横向变化可以控制地核内流体运动状态,并足以产生现今观测到的地磁变化,进而影响地磁极性倒转频率。地磁极性倒转周期与地幔对流时间尺度的一致性可能说明了前者受到后者的调制作用,这正是白垩纪和二叠纪超静磁带出现的原因。但在接受这一观点之前,必须有相应的理论模型来支持,因为还有一些研究得出相反的结论,即对流系统的低热流通量和低地幔活动将促使不稳定的出现,从而导致地磁极性倒转。由此可见,人们对发电机过程和地磁极性倒转的物理机制还缺乏清楚的认识。

地幔对流可能影响地核发电机过程和地球磁场长期变化的另一个可能机制是CMB形态中机械和热效应。由于CMB形态变化的影响,绝热过程与重力均衡不再是一致的,因而将出现横向温度梯度效应以及流体系统与地幔之间的机械作用。因此,地幔中的热结构可能控制着地磁极性倒转。地幔中的热扰动可能与D'层内热边界层的不稳定相联系,而这种热扰动可能对核内流体运行起调制作用,从而导致了相对稳定和快速倒转周期的出现。地幔内的周期性对流要求1.5亿年才能使热边界层得以建立并最终成为亚稳态。边界层的建立将导致CMB热流边界条件短暂的变化。这可以解释观察到的自白垩纪以来倒转频率逐步增加这一现象。这种核-幔热和机械耦合模式强调了D'层内动力学过程的重要性及其与地球磁场之间的关系。

必须注意,磁流体力学是无法解释地磁极性转换期间VGP环太平洋分布和持续时间只有100年的快速倒转这些观测结果,因此目前的发电机理论仅能提供一般性的结论,还不能为解释地磁极性倒转提供令人满意的理论模型。但是,近年来发电机理论研究有了长足的进展,相信在不久的将来,可能会有一定的突破。有关极性转换期间地球磁场形态学还需开展更广泛的实验和理论研究。我们认为,尽管沉积剩磁的成因机制还有待进一步研究,但由于沉积岩具有分布范围广和连续性好的优点,仍是研究极性转换的合适地质体。

参 考 文 献

- [1] David P. C. R. Acad. Sci., 1904, **138**: 41-42.
- [2] Bruhuhs B. J. Phys., 1906, **5**: 705-724.
- [3] Gubbins D. Rev. Geophys., 1994, **32** (1): 61-83.
- [4] Lowrie W. Philis Trans. R. Soc., London, Ser. A. 1982, **306**: 129-136.
- [5] Zhu R X, Liu C, Tschu K K. Chinese Sci. Bull., 1990, **35** (19): 1632-1637.
- [6] Zhu R X, Laj C, Mazaud M. Earth Planet. Sci. Lett., 1994, **125**: 143-158.
- [7] Hoffman K A. Nature, 1991, **354**: 273-277.
- [8] McFadden P L, Barton C E, Merrill R T. Nature, 1993, **361**: 342-344.
- [9] Egbert G. Gphys. Res. Lett., 1992, **19**: 2353-2356.
- [10] Gubbins D, Coe R S. Nature, 1993, **362**: 51-53.

- [11] Knittle E, Jeanloz R. *Science*, 1991, **251**: 1438-1443.
- [12] Lay T. *EOS*, 1989, **70** (4): 49-59.
- [13] Hide R. *Science*, 1967, **157**: 55-56.
- [14] Schloessin H H, Jacobs J A. *Can. J. Earth Sci.*, 1980, **17**: 72-89.
- [15] 朱日祥, 金增信, 刘椿. *第四纪研究*, 1991, **2**: 123-129.
- [16] Bloxham J, Gubbins D. *Nature*, 1985, **317**: 777-781.
- [17] Bloxham J, Jackson A. *Rev. Geophys.*, 1991, **29**: 97-120.
- [18] Gubbins D, Bloxham J. *Nature*, 1987, **325**: 509-511.
- [19] McFadden P L, Merrill R T. *Phys. Earth Planet. Sci.*, 1986, **89**: 22-33.
- [20] Loper D E, McCartney K. *Geophys. Res. Lett.*, 1986, **13**: 1525-1528.
- [21] Larson R L, Olson P. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, **107**: 437-447.
- [22] Jacobs J A. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1981, **33**: 527-529.
- [23] Olson P, Hagee V L. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**: 4609-4620.

CONNECTION BETWEEN GEOMAGNETIC FIELD AND THE EARTH'S INTERIOR

Zhu Rixiang

(*Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*)

Abstract It is very important to study the connection between geomagnetic field and physical/chemical action in the Earth's interior. Especially, reversal frequency may be modulated by mantle convection; the overturn time of core fluid, being much shorter than the time interval of stable polarity, is close to the duration time of polarity transition, which may partly imply that geomagnetic polarity reversal be controlled by the dynamo of the mantle; rapid polarity shift during transition, taking about a hundred years, may be produced by the core-mantle transition zone (D'' layer). The basic theory of generation of the Earth's magnetic field, being typical geoscience, remains one of nature's most challenged phenomena. To study the structure, mineral composition and dynamical action in the Earth's interior is most important to understanding resource, environment and disaster for serving social development. A brief review about the above studies has been presented in this paper.

Key words geomagnetism, geomagnetic polarity reversal, the earth's interior action