

谜一般的地球内核

(中国科学院地质与地球物理研究所 徐文耀 编译自 Bruce Buffett.

Physics Today, 2013, (11): 37, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

如果我们作一次从地表向地心的旅行, 首先要穿越地壳与地幔岩石圈层。走过近一半路程(约 2900 km), 就会碰到液态外地核。继续向下, 地核由液态过渡到固态, 这就是内地核(图 1)。虽然内核温度与太阳表面温度差不多, 但是, 这里的压力很高, 故而介质呈固态。

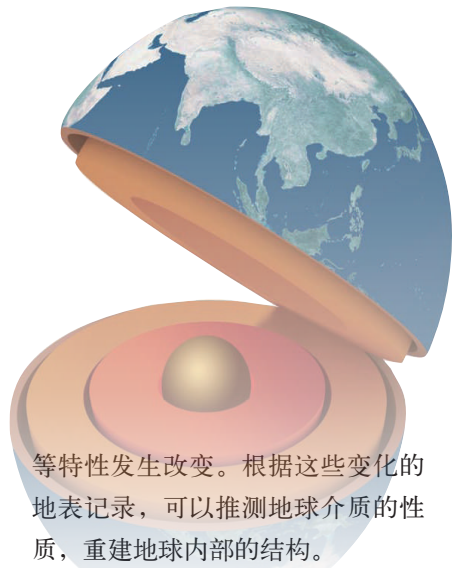
地球内核体积不到地球的 1%, 但是, 它在地球内部动力学过程中所起的作用之大令人惊讶。随着地球的冷却, 紧邻内核的外核流体逐渐凝固, 使内核半径每年增大 1 mm。在凝固过程中, 液态铁中的潜热释放, 杂质析出, 在外核中引起浮力流动, 它们搅动着外核流体, 产生了地磁场。据估计, 产生磁场所需

的能量有一半以上来自内核增长。

日益增多的观测显示, 内核结构出乎意料的复杂。早期简单模型设想, 内核是从充分混合的流体中缓慢地径向增长而成的, 但是地震波速度和衰减的横向变化证据与此完全不符。内核的这些复杂性可能是过去动力学历史的记录, 读懂这些记录有助于获得关于地球历史的新认识, 有可能揭示为什么地球演化与最邻近的其他行星如此不同的原因。

发现与惊奇

当地震波穿过地球传播时, 像明灯一样, 照亮了地球内部结构, 酷似医学中的 X 成像。地球介质的差异使地震波的吸收、散射、传播



等特性发生改变。根据这些变化的地表记录, 可以推测地球介质的性质, 重建地球内部的结构。

1936 年, 地震学家 Inge Lehmann 根据地震波反射提出存在地球内核的设想, 35 年后, 地球弹性简正模型的观测证实了地球中心刚度有限。现代的地核研究通过地震波的差分测量(即对比穿过内核的地震波与紧贴内核表面的地震波传播时间差异), 发现地震波轴向速度比赤道面速度快百分之几, 揭示了内核介质的弹性各向异性。进一步研究

发现, 各向异性西半球强而东半球弱, 深部强而浅部弱。

1990年代中期, 人们发现地震波衰减也呈现各向异性, 即波速快往往与衰减强相伴随, 这与非完全弹性固体中的频散效应刚好相反, 而用地震波的散射则可解释这种特征。

热模型

内核增长极其缓慢, 靠观测不能发现这种微小变化, 但是可以用地核热演化模型进行预报。地核热量通过热传导输送到巨大的地幔岩石圈层。地核物质黏性很小, 千分之几度的温度异常就可以驱动 10^4 m/yr 的快速流动; 但是地幔物质黏性很大, 其对流速度只有 0.1 m/yr。然而, 正是这缓慢的地幔对流最终控制着地核冷却和内核增长。

在遥远的过去, 整个地核可能很热, 处于液态。随着地球的冷却, 地球中心的温度逐渐降低, 最终形成固态内核。凝固之所以从地球中心开始, 是因为铁的溶解曲线取决于压力(见图2)。从内核开始增长到现在, 内核顶部温度降低了 60 K, 现今内核的大小反映了从内核输出的总热量。

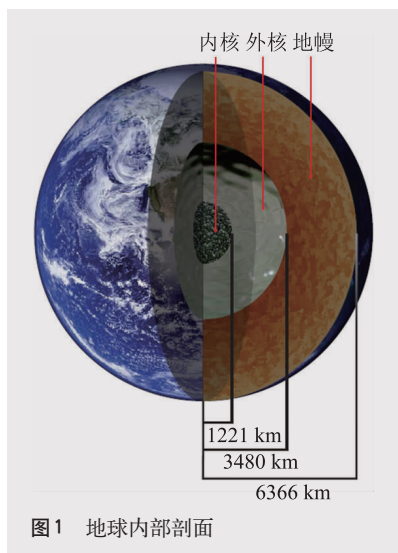


图1 地球内部剖面

内核增长的速度决定于从地核输向地幔底部的平均热流, 地核输出热量导致地核冷却, 冷却引起凝固。但是, 凝固时释放的潜热会减小最终的温度变化。此外, 在内核凝固时, 杂质从液态铁核中析出, 这些杂质产生的浮力流动有助于搅动外核。杂质从凝固的铁中分离, 进入流体外核, 导致地球重力势能减小, 从而减小地核温度变化, 减缓凝固过程。据估计, 现在的内核是在 10 亿年内形成的。此前地核中的对流主要是由地核冷却时冷而稠密的流体从核幔界面下沉驱动的。

动力学

古岩石磁化强度的测量表明, 地磁场至少经历了 32 亿年的历史, 其间不断涨落, 多次倒转。磁场的持续存在意味着在地球历史的大部分时段, 地核流体一直处于对流扰动中。内核形成后, 它的增长引发了新的过程, 这些过程在增长的内核中留下了印记。

由于液态铁黏性很小, 所以固态内核可以相对于地幔旋转。早期有关地核对流和磁场形成的数值模型预言, 内核旋转速率大约每年 1 度, 在这些模型中, 外地核底部的东向流动带着内核一起旋转。

内核另外一种运动类型是由内核热对流产生的。在没有重要热源的情况下, 如果内核迅速增长, 则传导冷却来不及进行, 对流必然发生。在此情况下, 热而轻的物质在冷而密的物质之下形成。即使内核是固体, 这样的密度分层也是不稳定的, 可以通过蠕变流动发生对流翻转。与此相反, 如果内核增长缓慢, 传导冷却来得及进行, 则内核中心的物质变冷变密, 这样的密度分层是稳定的, 对流不会发生。现

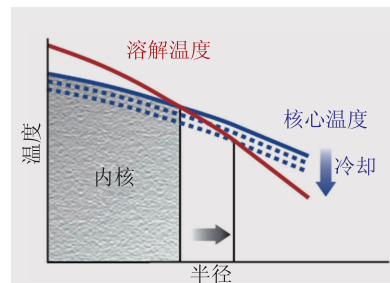


图2 地球内部温度(蓝色)和地核溶解温度(红色)随地心距的变化。两条曲线的交点确定了内核半径

今内核可能处于稳定分层和非稳定分层之间的转换状态。

内核结构的起源

内核弹性各向异性通常归因于晶格沿优势方向排列, 这种优势取向(又叫纹理)可以在初始凝固时建立, 也可以因随后的变形而形成。室内试验表明, 介质凝固时在温度梯度方向可能产生最初的纹理, 数值模拟显示, 内核表面的温度梯度基本上沿半径方向。于是, 在初始凝固时, 晶体沿径向排列, 不显示各向异性, 这是内核表层 100 km 的情况。

带有初始纹理的内核介质在随后的变形中产生了观测到的各向异性。因为沿自转轴波速快的特征不可能是偶然形成的, 故可认为, 这种变形必然受到地球旋转的影响。这样的变形可以由多种途径产生。例如, 内核热对流可能沿自转轴, 只要对流较弱; 又如, 内核赤道增长可以产生轴向流动, 只要内核黏性不太大。此外, 电流和磁应力也可能有所希望的对称性, 因为与之伴随的外核过程受到旋转的强烈影响。

地球内核就像地质学家眼中的出露岩石一样, 地质学家对一块小小的岩石, 就可以说一大段精彩的故事, 而地球中心的固态铁核也有这样的精彩故事。