地球内核的地震波速各向异性与其自转有关

刘 斌[④] 张群山 王宝善 傅容珊[④] H. Kern[㈣] T. Popp[㈣]
(中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026; ④第三世界科学院地球科学与天文学高级研究中心, 合肥 230026;
㈣Mineralogisch-Petrographisches Institut, Uni. Kiel, 24098 Kiel, Germany)

摘要 地球内核相对于外部地球存在差异转动, 固体内核表面相对于液态外核运动的线速度在赤道上最大, 在两极为零. 因此内核生长速度在赤道附近比两极处快. 引力作用将驱动其内部的物质由赤道向两极流动使其保持近似球形. 与这一流动相应的轴对称应力场使得六方紧密堆积(hcp)铁晶体的 c 轴沿内核自转轴方向排列, 导致地震波速度各向异性.

关键词 地球内核生长 自转 流变 晶体定向排列 各向异性

近年来许多研究者认真分析穿过地球内核的地震波, 发现了地球内核的轴对称各向异性(横向各向同性)[1~3]: 沿南北极方向地震波的传播速度快, 而在赤道面内地震波的传播速度较慢. 地震波速的各向异性是由内核组成物质的结构决定的. 高温高压实验等相关研究推断[4,5], 地球内核主要由六方紧密堆积(hexagonal close packed, hcp)的铁(ε phase)组成. 六方紧密堆积的铁晶体是轴对称各向异性(横向各向同性)的, 弹性波沿 c 轴方向传播速度快, 在与 c 轴垂直的方向传播速度较慢. 当组成地球内核的铁晶体的 c 轴沿南北极方向排列时, 就会产生观测到的地震波速各向异性. 一般认为, 岩石类材料的结构是由形成时的物理化学环境, 特别是所处的应力状态决定的[6]. 内核绕自转轴的转动将会在内部引起轴对称的应力场, 正是这种应力环境造成了地球内核的轴对称各向异性的结构, 最终导致地震波速的轴对称各向异性.

1 内核的结晶生长与物质流动

根据 Song 和 Su 等人的研究[7,8], 地球固体内核的转动速度比外部地球快. 因此固态内核相对于液态外核存在相对转动. 在内核表面, 这种相对运动的线速度在赤道位置最大, 而在两极为零, 可以用与北极方向夹角(θ)的正弦函数($\sin\theta$)表示. 另外根据晶体生长理论, 当从熔融状态结晶时, 晶体的生长速度与晶体和熔融物质之间相对运动的速度成正比[9]. 所以当固态地球内核在液态外核中结晶生长时, 沿赤道方向的生长速度比两极方向的快, 可以用函数 $u = u_0 + u_r(\sin\theta - 2/\pi)$ 表示, 其中 u_0 是内核平均生长速度, u_r 为比例常数. 若考虑对称性可以将其写成只包含偶数阶的勒让德函数, 只需展开到四阶项就可以将截断误差控制在2%以内. 如果内核按此方式一直生长下去将会长成扁平的形状. 但考虑到地球内核处于极高的温度和压力环境, 在地质过程时间尺度内具有很强的塑性和流变性, 在万有引力场的作用下它将保持近似球形的状态, 即在内核生长过程中晶体生长速度较快的赤道附近的物质会向两极区域流动, 形成轴对

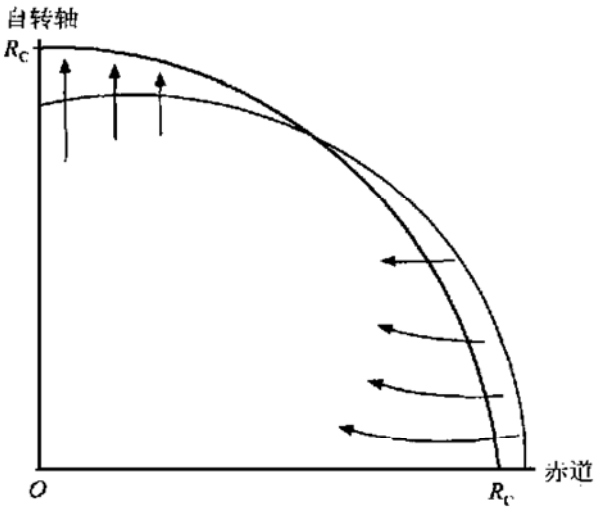


图1 内核内部物质的流动

称的流变场[3](图 1). 在内核边界处物质流动的速度可以用内核生长的相对速度 $u = u_r(\sin\theta - 2/\pi)$ 表示, 赤道附近晶体生长速度快, 物质流动的速度为正, 表示流入内核内部; 两极附近晶体生长速度慢, 物质流动的速度为负, 表示向内核外部流动.

2 内核中的应力场

前述由赤道附近向两极区域的物质流动必然伴随着轴对称的应力场[3]. 列出斯托克斯方程:

$$-\Delta\left|\frac{p}{\rho}\right| + \nu\Delta^2 u = 0, \qquad \Delta \cdot u = 0,$$

其中 ρ 是介质密度, p 是叠加在静水压上的应力场, ν 是动力学粘滞系数, u 是介质流动的速度, 对于这里讨论的 u 不存在环型场, 只有极型场, 可以也用相应的勒让德函数表示. 求解后可以得到内核中叠加在静水压上的应力场分量 σ_{rr}, $\sigma_{\theta\theta}$, $\sigma_{\phi\phi}$, $\sigma_{r\theta}$, 另外两个分量为零. 而后可以求出 3 个主应力 σ_1, σ_2, σ_3 的大小和方向以及主坐标系下与之对应的 3 个偏应力 σ'_1, σ'_2, σ'_3. 由于主坐标系下 3 个偏应力的代数和一定为零, σ'_1, σ'_2, σ'_3 必然是异号的, 肯定有一个与另外两个符号相反, 两个正一个负, 或两个负一个正. 计算结果表明, 除了表面很浅的一层外, 内核中偏应力 σ'_1, σ'_2 在与自转轴垂直的平面内, 是压应力; 偏应力 σ'_3 与自转轴平行, 是张应力(图 2). 这实际上与在静水压作用下沿轴向拉张的圆柱体内物质的移动趋势及相应的应力场分布是类似的. 计算中所用模型参数均引自文献[3].

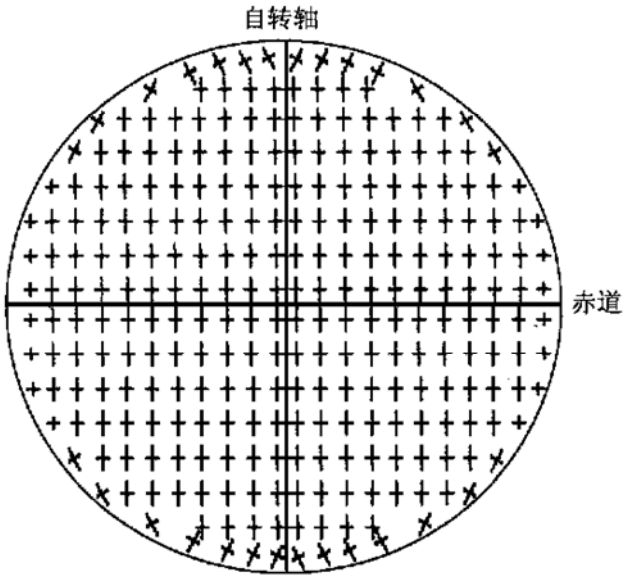


图 2 内核中的偏应力场分布
长线表示张性偏应力, 短线表示压性偏应力

3 hcp 铁晶体定向排列与内核的各向异性

根据 Kamb 的理论分析[3, 10, 11], 六方紧密堆积(hcp)的铁晶体的 c 轴总是试图沿着主坐标系下与另外两个符号相反的那个偏应力的方向排列, 以保持系统的能量最低. 所以在地球内核中, 铁晶体的 c 轴将沿与内核自转轴平行的方向排列. 弹性波沿 c 轴方向传播速度快, 在与 c 轴垂直的方向传播速度较慢, 由此造成观测到的地震波速度各向异性.

轴对称的地震波速度各向异性是由轴对称的结构各向异性决定的, 而轴对称的结构各向异性又是由轴对称的应力场产生的, 轴对称的应力场又与轴对称的流变场相关, 而轴对称的流变场又是由于地球内核绕自转轴的转动引起的. 所以, 地震波速度各向异性的对称轴应该与地球内核的自转轴重合. Song, Su 等人[7, 8]观测到内核的各向异性对称轴与地球的自转轴有 11°左右的夹角, 而且这个对称轴绕地球的自转轴有每年 1~ 3°的差异转动, 据此认为地球内核比外部地球转得快. 按本文分析, 地球内核各向异性的对称轴应该是其自转轴; 因为如果内核的自转轴与地球的自转轴重合, 从物理上很难解释为什么内核的结构对称轴会与地球的自转轴有 11°左右的夹角. 如果确是如此, 每年 1~ 3°的差异转动可能不是地球内核相对于外部地球的自转速

度,而是地球内核相对于外部地球的进动速度. Song 等人[7]文中也对内核的自转轴是否在二分点的进动过程中与地球的自转轴保持一致提出了疑问. Su 等人[8]观测到内核各向异性对称轴与地球自转轴之间的夹角存在周期约为 8.39 a 的起伏变化,可能就是伴随着这一进动的章动. 由于外核是液态的,其动力学粘滞系数的理论值最低可达 $3\times10^{-7}\sim 2\times10^{-5}$ $m^2\cdot s^{-1}$[12],内外核之间的力学偶合很弱,固态地球内核象行星一样在地球内部相对自由地运动是可能的.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 49874042)和国家攀登计划(编号:97023103)资助项目,还得到德国洪堡基金会与中国科技大学青年基金的资助.

参 考 文 献

1 Stixrude L, Cohen R E. Highr-pressure elasticity of iron and anisotropy of earth's inner core. Science, 1995, 267: 1972~ 1975
2 Sayers C M. The crystal structure of iron in the Earth's inner core. Geophys J Int, 1990, 103: 285~ 286
3 Yoshida S, Sumita I, Kumazawa M. Growth model of the inner core coupled with the outer core dynamics and the resulting elastic anisotropy. J Geophy Res, 1996, 101(B12): 28085~ 28103
4 Stixrude L, Cohen R E. Constraints on the crystalline structure of the inner core: Mechanical instability of BCC iron at high pressure. Geophysical Res Lett, 1995, 22(2): 125~ 128
5 Boehler R, Bargen N, Chopelas A. Melting, thermal expansion, and phase transitions of iron at high pressures. J Geophy Res, 1990, 95(B13): 21731~ 21736
6 Wenk H-R. Preferred Orientation in Deformed Metals and Rocks: An Introduction to Modern Texture Analysis. New York: Academic Press, Inc, 1985
7 Song X D, Richards P G. Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core. Nature, 1996, 382: 221~ 224
8 Su W, Dziewonski A M, Jeanloz R. Planet within a planet: Rotation of the inner core of Earth. Science, 1996, 274: 1883~ 1887
9 [英]潘普林 B R. 晶体生长. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981. 146~ 148
10 Kamb W B. Theory of preferred crystal orientation developed by crystallization under stress. J Geol, 1959, 67: 153~ 170
11 Kamb W B. The thermodynamic theory of nonhydrostatically stressed solids. J Geophys Res, 1961, 66: 259~ 271
12 [澳]兰伯克 K. 地球自转的变化. 北京: 地震出版社, 1988. 28

(1998-08-13 收稿, 1999-01-08 收修改稿)

自然界泥石流流变模型的探讨

王裕宜 费祥俊④

(中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院东川泥石流观测研究站, 成都 610041;
④清华大学水利系, 北京 100084)

摘要 应用野外现场泥石流体和浆体的观测实验资料,根据不同类型粘性泥石流的流变特性对无量纲线性粘碰混合模型的2个参数进行修正,求得高浓度泥石流体的流变模型. 2个参数的修正是指: ( ) 对线性浓度指数进行高粘性介质的修正; ( ) 对极限浓度进行颗粒组成不均匀的体积浓度的修正.

关键词 **泥石流 流变模型 线性浓度指数修正 极限浓度修正**

近年来为了探求泥石流形成和运动机理,美国、日本、新西兰和中国的泥石流专家们在模拟泥石流理论模型时,对泥流、水石流、泥石流都进行了大量的工作,并已提出了二维不恒定流