

85-90

起潮力作为地球演化的一种动力的探讨

骆鸣津

(河南省地震局, 郑州 450000)

池顺良

(鹤壁市地震办公室, 鹤壁 458000)

p 311

摘要 讨论了潮汐弹性位能的量级和转化及内波形成的机制, 认为当地球是一个非完全弹性体(耗散体)时, 在周期潮汐应力作用下, 地球莫霍面上弹性位能的耗散可达 $300 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 的产热量, 大大超过了花岗岩中放射性物质 $3 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 的产热量. 在地球内部密度有差异的化学界面上(如莫霍面), 当其两侧有物质进入弹塑性状态成为马克斯威尔体时, 在界面起伏部位的倾斜面上, 水平面上的潮汐剪切应力在倾斜面上的分力, 使两侧的物质作反向流动, 扩大了界面的起伏, 形成内波. 本文还用重力分异的观点讨论了莫霍面是一个化学界面的问题.

主题词 地球动力学, 重力分异, 引潮力, 莫霍间断面, 内波, 弹性位能耗散

起潮力

地球演化

1 莫霍面是化学界面

板块学说是建立在地幔对流的基础之上的. 该学说认为, 地幔为单层均匀流体或双层流体系统. 这样的系统具有恒定不变的物理化学性质和过程. 板块由温度导致的浮力驱动, 忽略熔化、相变以至压力的作用. 地幔自始至终一直是均匀的. 同时还认为, 海洋地壳(玄武岩)与地幔中的岩石属于同一种化学物质, 莫霍面为它们的相变面(如同冰与水的关系). 海洋地壳中的物质可以返回地幔内, 参与对流. 但是, 事实表明这种观点值得商榷.

地震波测量结果表明, 在地幔尤其是上地幔中存在很大的横向不均匀性及几个地震波波速不连续面^[2].

根据太阳系及行星起源演化理论, 行星是星际尘埃和星子物质吸积凝聚而成的. 初始的行星是比较均匀的, 随着放射性物质产生的热能和吸积碰撞产生的热能的累积, 使行星物质熔化, 比重大的铁镍物质向中心集聚形成地核, 比重较轻的物质向表面移动, 形成地幔和地壳. 这一过程称为重力分异. 在长期重力分异作用下形成化学分层. 经重力分异的物质是不能重越界面逆转的, 也即地壳物质不能跨越莫霍面参与地幔对流. 据天文学家研究, 行星都为重力分异结构^[2], 因此, 地球也不可能例外.

地幔对流学说除了假定地幔和海洋地壳同为一种化学物质外, 还必须假定所需热能来自地幔底部, 而不是在顶部. 其热能的来源最大可能为放射性物质. 文献[3]指出“放射性热量

本文1996年7月16日收到, 10月8日收到第一次修改稿, 1997年8月20日收到第二次修改稿.

第一作者简介: 骆鸣津, 男, 63岁, 研究员, 现从事重力及固体潮研究工作.

随深度呈指数减小”“一个具有花岗岩平均生热率的上地壳就足以产生来自地球内部的所有热流量”。其原因是经重力分异作用,将放射性物质带向地表。地壳中放射性元素的含量比地幔中要大2~3个数量级^[4]。从放射性元素分布看,地壳也未重返地球内部使放射性元素分布均匀化。

现在多数人认为莫霍面是一个化学界面^[4]。按此观点,则密度为3.0 g/cm³的玄武岩地壳就不可能插入莫霍面下面密度为3.3 g/cm³的地幔物质中去。即使强行插入,也不可能融结为一体,还会因重力分异作用而浮出,因此也就不可能参与对流。

重力分异并不排斥热点的集中。在地壳长期演化中和已经形成的边界环境的制约下,轻的物质上升时,在某些地方、某些时候形成一些通道,将热能聚于某点。也会有冷而重的物质下沉。这种物质上下运动是分异而不是对流。重力分异也不排除同一化学层内部的冷热分异,如低速层聚于地幔顶部。由于重力分异形成许多化学层,每层内部有冷热分异,故地球内部存在若干层低速层。

2 起潮力引起的潮汐弹性能的量级及其转换

从弹性力学可知,弹性能 W 可写为:

$$W = W_1 + W_2 \quad (1)$$

$$W_1 = \frac{1}{2E}(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{\lambda\lambda})^2 \quad (2)$$

$$W_2 = -\frac{1}{2\mu}(\sigma_{rr}\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{\theta\theta}\sigma_{\lambda\lambda} + \sigma_{\lambda\lambda}\sigma_{rr} - \sigma_{r\theta}^2 - \sigma_{\theta\lambda}^2 - \sigma_{\lambda r}^2) \quad (3)$$

式中 W_1 为球形应力张量作用下体应变能。球形应力张量只会引起弹性体积变化^[5],不会引起塑性体积变化,因此在它作用下不会产生能量的转化,也就不会有能量的积累。 W_2 为偏斜应力张量作用下产生的畸变能。材料要满足屈服条件时才能进入塑性状态。塑性状态仅与偏应力张量有关。在周期偏斜应力作用于塑性状态材料——耗散结构下,才会有能量的转化和积累。故本文只须讨论 W_2 ,不须讨论 W_1 。

对地球而言,(3)式中的应力可分为两部分,其一为没有起潮力扰动情况下地球某点的真实应力,称为初始应力,用 σ_0 表示。在估算时将 σ_0 简化为流体静力平衡时之应力 σ_0 与另一潮汐形变应力 P_{ij} 之和,即

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 + P_{ij} \quad (4)$$

流体静力平衡状态下的初始应力与主应力相等。此时无剪切应力作用。莫霍面上的初始应力——压力

$$\sigma_0 = \int_{0.99R}^R g(r)m(r)dr \doteq 1.713 \times 10^9 \text{ Pa}$$

采用文献[6]所用的地球模型,并假设

$$e_{\theta\theta} = e_{\lambda\lambda} = \frac{1}{2}(e_{\theta\theta} + e_{\lambda\lambda}) = \frac{1}{2} \frac{1-\nu}{E}(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{\lambda\lambda}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{得} \quad \sigma_{rr} = & \frac{1}{rg(r)} \sum_{n=2}^{\infty} \left\{ \lambda \left[r \frac{\partial H_n(r)}{\partial r} + 2H_n(r) - n(n+1)L_n(r) \right] + \right. \\ & \left. + 2\mu r \frac{\partial H_n(r)}{\partial r} \right\} T_n(R, \theta, \lambda) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\lambda\lambda} = \frac{1}{rg(r)} \sum_{n=2}^{\infty} \left\{ \lambda \left[r \frac{\partial H_n(r)}{\partial r} + 2H_n(r) - n(n+1)L_n(r) \right] + 2\mu \left[H_n(r) - \frac{n(n+1)}{2} L_n(r) \right] \right\} T_n(R, \theta, \lambda) \quad (7)$$

式中 $H_n(r)$, $L_n(r)$ 为 n 阶勒夫数, 在文献[6]的表1中给出了各 r 之值; E 为扬氏模量; ν 为泊松比; μ 为剪切模量; $T_n(R, \theta, \lambda)$ 为 n 阶球面 ($r=R$) 起潮力位。取 $\lambda = 1.0286\mu$, $\nu = 0.2535$, $E = 7 \times 10^{10}$ Pa。用 ΔP_{ij} 表示潮汐形变应力的振幅。在波峰处 $P_{ij} = \Delta P_{ij}$; 在波谷处 $P_{ij} = -\Delta P_{ij}$, 代入(4)式可得波峰时的地球应力 $\sigma_{ij} = \sigma_0 + \Delta P_{ij}$; 在波谷时的地球应力 $\sigma_{ij}' = \sigma_0 - \Delta P_{ij}$ 。

以 $0.99R$ 作为莫霍面, 将文献[6]的表1中 $0.99R$ 的勒夫数和上述的弹性参数代入(6)式和(7)式, 将所得结果再代入(3)式, 即可得出波峰和波谷处的畸变位能 W_2 和 W_2' 。

起潮力位可表示为不同周期简谐波之和。简谐波周期由地球和月球轨道参数的各种组合而定。起潮力位中振幅最大的简谐波为 M_2 波。现以 M_2 波为例计算, 得到波峰和波谷处弹性位能之差

$$W_2 - W_2' = 108.224 \text{ Pa} = 108.224 \text{ J/m}^3$$

地球并非完全弹性体, 可以通过地震波和地球振荡来测定地球品质因子 Q 。曾融生先生指出在地幔内 Q 值大多数为 $100 \sim 500$ ^[4], 则弹性位能的耗散 ΔE 可用弹性位能 E 和品质因子 Q 算出^[5]:

$$\Delta E = 2\pi E/Q = 4\pi E\gamma/\omega \quad (8)$$

因此 M_2 波从波峰到波谷有 $1.357 \text{ J/m}^3 \sim 6.798 \text{ J/m}^3$ 的能量耗散。从波谷到波峰也有相同的能量耗散。在 M_2 波一个周期(12.42 h)内平均耗散功率为 $60 \mu\text{W/m}^3 \sim 300 \mu\text{W/m}^3$, 此值已大大超过了花岗岩内放射性物质 $3 \mu\text{W/m}^3$ 的产热量^[3]。以上估算的仅是起潮力位一个潮汐的能量耗散, 实际起潮力位的能量耗散为各个潮汐的能量耗散之和。从(8)式可以看出, 能量耗散 ΔE 与圆频率 ω 成反比。由于固体潮的 ω 大大小于地震波的 ω , 故其能量耗散应比地震波高。

当地球为一完全弹性体时, 在一个周期内弹性位能没有变化, 无能量耗散。当地球为一耗散体时, 弹性位能随时间发生变化, 每时每刻都有能量耗散, 并且不能逆转, 故可累加。

能量耗散的大小与初始应力的大小有关。用 a, b 表示初始应力, 用 $\Delta a, \Delta b$ 表示潮汐形变应力的振幅, 则从波峰到波谷的能量变化为

$$(a + \Delta a)(b + \Delta b) - (a - \Delta a)(b - \Delta b) = 2(a\Delta b + b\Delta a)$$

从这个意义上讲起潮力的变化是释放初始应力弹性位能的一种机制。

实际地球介质存在很大的横向不均匀性, 使得初始应力中的主应力存在差异以及剪应力与扩大潮汐形变应力出现差异, 使畸变能 W_2 大为增加, 从而增加了能量耗散。

耗散的弹性位能大部分转化为热能。由于地球介质的非均匀性和 Q 值的非均匀性, 会形成某些地方热能高, 从而降低 Q 值。 Q 值的降低增加了弹性位能的耗散, 使介质的热能增加, 再次降低 Q 值。这种循环不断发展, 在某些地方可以造成“雪崩”, 形成热点。有的热物质上升至化学界面上。由于在界面上有起伏的部位有热物质上升, 使初始剪切应力增加, 促进内波^[1]的形成。

在介质的密度有差异的化学面上, 由于起潮力的交变作用, 在某些热量高粘滞系数低的部位, 会使密度小的地壳物质沿界面向下移向山根, 密度大的地幔物质沿界面移向沟底, 形成内波。这种轻重物质的交换增加了重力位能, 故界面上弹性位能耗散转化为重力位能。

根据内波学说^[1],地壳是由重力分异作用逐渐形成和增厚的.远古时的地壳以海洋地壳为主,陆地很少,地壳厚度比较均匀.由于起潮力的作用,内波发展,使山根更大,山体更高,海洋地壳更薄,陆地增加.内波发展增加的重力位能超过了大气营运剥蚀地表所降低的重力位能.

按重力分异的观点核幔边界也是化学分界面,也应有内波发展.地震波观测结果表明液核是真正液体,横波不能通过.严格来说,均衡应是以核幔起伏界面两侧介质密度差引起的浮力来平衡核面以上物质分布不均匀导致的压力.

3 内波形成的力学机制

假定莫霍面两侧某些地方物质的温度升高,粘滞性降低,进入弹塑性状态,产生弹性应变和塑性应变.其中塑性形变仅是偏斜应力张量作用的结果.莫霍面上的剪切应力属于偏应力张量.

弹塑性体的模型很多.几种有代表性的如马克斯威尔体、伏依特体及标准线性体.马克斯威尔体在应力消失后留有残余形变,其他两种模型在应力消失后,随着时间的推移,应变也逐渐地回到零位.但是当应力交变的周期大大小于应变回零时间的情况下,也有残余形变.马克斯威尔体是理想弹塑性体,其本构方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{de}{dt} &= \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{\mu} \frac{d\sigma}{dt} \\ e(0) &= \frac{1}{\mu} \sigma(0) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 e 为应变, σ 为应力, μ 为剪切模量, η 为粘滞系数.

当莫霍面两侧物质进入弹塑性状态,成为马克斯威尔体时,如果莫霍面附近某一部位在剪切应力的作用下地壳向左地幔向右运动,则在边界面上地壳对地幔的作用力向左,地幔对地壳的作用力向右,此时的剪切力为加载力.卸载的剪切力与加载的剪切力方向相反.经过加卸载力作用后,地幔物质向左留有残余形变,即向左流变.地壳物质向右流变.潮汐形变力可表示为各潮波简谐形变力之和.因此每一种潮波的形变应力必然有与加载力和卸载力相等的反向加载力和反向卸载力.在反向加载力和反向卸载力的作用下,使地幔物质向右流变,地壳物质向左流变.因此当莫霍面呈水平状态时,在周期剪切应力作用下,即使其两侧的物质进入弹塑性状态,也不可能产生物质的定向流动,只形成双向流变,即摆动.

当莫霍面有起伏时,其简化模型如图1所示.图中UD为起伏形成的斜面.在图1中用3表示水平莫霍面上加载的剪切应力,4为卸载的剪切应力.它们在UD斜面上的分力 $\vec{f}_g$ 和 $\vec{f}'_g$ 为加载剪切应力, $\vec{g}_f$, $\vec{g}'_f$ 为卸载剪切应力.由于两种分力的作用使地幔物质向上流变,地壳物质向下流变.图1中5,6表示水平莫霍面上反向的加载力和卸载力,在莫霍面的倾斜面UD上形成卸载的剪切应力 $\vec{f}_h$, $\vec{f}'_h$ 和加载的剪切应力 $\vec{h}_f$, $\vec{h}'_f$; 故加载力为 $\vec{h}_g$ 和 $\vec{h}'_g$, 卸载力为 $\vec{g}_h$ 和 $\vec{g}'_h$, 而无反向的加卸载剪切应力.若水平莫霍面上的剪切应力表示为

$$\sigma = A \sin \alpha x \quad (10)$$

则倾斜莫霍面UD上的剪切应力可表示为

$$\sigma_s = [A \sin(\alpha x - \frac{\pi}{2}) + A] \sin \alpha \quad (11)$$

在 σ_s 作用下,进入马克斯威尔体的莫霍面两侧物质作定向流动,从而扩大了莫霍面的起伏,形

参考文献

- 1 池顺良. 大地构造和海陆起源的内波假说. 地壳形变与地震, 1996, 16(1~3).
- 2 安德森 D L. 地球的理论. 关华平等译. 北京: 地震出版社, 1993. 11, 25, 40, 60.
- 3 邦特巴思 G. 地热学导论. 易志新等译. 北京: 地震出版社, 1988. 17.
- 4 傅承义, 等. 地球物理学基础. 北京: 科学出版社, 1985. 420, 441.
- 5 杨桂通. 弹塑性力学. 北京: 人民教育出版社, 1980. 61, 67, 83.
- 6 高锡铭, 等. 月亮和太阳的潮汐位产生的地球形变位. 地壳形变与地震, 1992, 12(3): 1~12.

A DISCUSSION ON THE TIDAL FORCE AS ONE DYNAMIC FORCE OF EARTH EVOLUTION

LUO Mingjin

(*Seismological Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450000*)

CHI Shunliang

(*Seismological Office of Hebi City, Henan Province, Hebi 458000*)

Abstract

In this paper, the magnitude and transformation of tidal elastic potential energy and the formation mechanism of internal wave are discussed. In fact, the earth is a non-perfectly elastic body (dissipative body), under action of periodic tidal stress, the dissipation of elastic potential energy on Moho surface will amount to $300 \mu\text{W}/\text{m}^3$ and exceed the output of heat quantity of radioactive matter in granite by a big margin. The chemical boundary surface in the earth such as Moho surface is a density discontinuity one. When some matter on both sides of the boundary is in elastico-plastic state and becomes Maxwell body, alternating loading and unloading shear stress in positive and opposite directions on the rising and falling boundary will be rectified to become one-way loading and unloading shear stress. It will make the matter on both sides directional and reverse movements each other along the boundary surface, forming internal wave. In the course the dissipated tidal elastic potential energy will be transformed into gravitational energy. By using the viewpoint of gravitational divergence, that Moho surface is a chemical boundary surface is discussed.

Key words Geodynamics, Gravity differentiation, Tide-generating force, Moho discontinuity, Internal wave, Dissipation of elastic potential energy