

核转变能与地球物质的演化

侯德封 欧阳自远 于津生 著

科学出版社

核转变能与地球物质的演化

侯德封 欧阳自远 于津生著

科 学 出 版 社

1 9 7 4

内 容 简 介

地球物质是由各种核类所组成。核类的形成、运动和演化以及各种核转变所产生的能量对地球的发展有着重要的影响。书中讨论了地球历史中各种天然核转变——衰变、裂变、核反应等的产生条件与规模；地球物质演化的主要能源是核转变能；根据地球历史中核转变能量演化的阶段性，划分地球物质演化的阶段；地球物质中的各种核转变对改变地球的化学成分与同位素组成的作用。

本书可供从事地质学、地球化学、地球物理和研究核转变的有关科技人员及高等院校的教学工作者参考。

核转变能与地球物质的演化

侯德封 欧阳自远 于津生著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1974 年 1 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

1974 年 1 月第一次印刷 印张：6 1/8

印数：0001—5,000 字数：135,000

统一书号：13031·183

本社书号：315·13-14

定 价：0.66 元

前 言

研究地球物质演化的能源是认识物质运动和地球发展历史的基本任务。本文试从自然界核转变能的角度来分析和认识地球的演化过程。核转变在地球发展史中是贯彻始终的,它是地球内部的必然的自己的运动;它能反映地球各发展阶段和地球演化过程中各特殊事物之间的关系。

究竟是什么能源主导着地球物质的运动呢?这个问题在人类对自然规律认识的不同时代有着各种不同的看法。在经典力学、机械运动最为盛行的时代,人们曾把机械能说成是地球演化的具有决定性的能源。当康德-拉普拉斯的天体演化学说获得公认后,炽热星云冷却的残余能是地球演化的主要能源曾在漫长的时期内占统治地位。而当原子的化学作用与电磁效应被人类发现和运用以后,人们除去继承机械能源学说以外,还进一步考虑了化学能的贡献。人们对地球演化能源的认识是从以外来能(宇宙能)为主逐步深入地认识到地球内能所起的决定作用。放射性的发现,对地球能源学说同样也起了革命性的影响。是不是人类今天对地球内能的认识就已经如实地全面地反映了客观的现实呢?很显然还没有,随着近代科学技术的进步,一定会获得更大的提高和更新的发展。

在最近几十年核物理、核化学的新发现和研究成就当中,除了核衰变作用外,还有两点引起了从事同位素地质、地球化学工作者的注意:一是核裂变的发现和核反应堆的建成;一是人工核反应的研究及超铀元素的合成,并对其物理化学性质所进行的研究。例如,近三十年来,对地球中各种低能核过程进行了广泛深入的研究,取得了一定的进展。天然矿物中的核衰变、核裂变和各种核反应的产物已被作为认识各种地质体形成和演变的重要标志。自然界各种核转变的产物,有些已作为一种特殊的同位素资源而加以开采利用。地球历史中裂变链式反应存在的研究,陨石、月岩及地壳岩石中超铀元素裂变产物的大量测定以及地壳中超铀元素的发现等都有着重大的进展。在陨石、月岩和地壳矿物中,相继发现有 U^{240} 、 Pu^{239} 、 Pu^{240} 、 Pu^{244} 、 Am^{241} 、 Am^{243} 、 Gm^{242} 和 Gm^{247} 等,在陨石、月岩和地壳矿物中发现有可能是 112—126 号元素的裂变计数、裂变径迹和裂变成因氙。自然界超铀元素而特别是超重元素的探索已成为核物理、核化学、地球化学工作者共同探索的重要领域。这些成就启发我们去考虑和探索在地球历史中除了衰变能起了重要作用以外,是否还可能存在其他类型的核转变能,除去目前已为大家所公认的 U^{238} 、 U^{235} 、 Th^{232} 和 K^{40} 等核的衰变能以外,是否还应该充分估计,在地球演化的早期中等寿期核类的衰变能、各种重核的裂变能,特别是超铀元素的贡献,以及它们对地球演化的影响。

为此,下面将着重讨论:

(1) 地球演化的阶段性——从太阳系元素的形成至地球形成,地球物质的演化,地壳发展阶段的过程、特征与发展的规律性。

(2) 地球物质演化的能源——地球发展史中能量的来源与分配,特别是地球历史中核转变的类型与规模;核转变能的条件及其能量对地质作用的影响;地球内部的热传导与热状态及地球内部的温度。地球历史中核转变能的演变与地壳运动的内在联系。

(3) 核转变与地球的化学成分及同位素组成的变异——核转变使地球的元素丰度与同位素组成产生变异,使地球物质中的元素及同位素新生、增多、减少和转化,核转变对地球物质成分的分布所造成的影响。

本文曾于 1963 年打印发送有关部门,征求意见,恳请指正。近十年来,这方面的研究进展极其迅速,特别是关于核转变能是地球演化的主要能源;地球物质中普遍发育着自发裂变、诱发裂变以及 18 亿年前自然界存在有链式反应的可能;核转变能与地壳运动;核转变对地球成分的更新等。在已发表的文献中得到不少验证,并对本文提供了有益的资料与数据。因此,我们进行了一些修改与补充。由于是老文新编,限于知识、实验工作和综合资料的不足,书中还会存在不少缺点和错误,希望读者批评指正。

目 录

前言	iii
第一章 地球演化的能源概述	1
一、地球的外来能	1
二、地球的内能	5
第二章 地球历史中天然核转变的类型	7
一、放射性核类按衰变半衰期的分类及自发裂变核类的半寿期	7
二、核类的原始丰度	9
三、地球演化过程中可能进行的核反应类型	13
四、天然中子源和产生链式反应的可能性	14
第三章 地球历史中的核转变能	17
一、放射性衰变能	17
(一) 短、中半衰期放射性同位素的衰变生成热	17
(二) 长半衰期放射性同位素衰变能的计算方法	18
(三) 地球放射性元素分布的设想	20
(四) 长半衰期放射性同位素的衰变能	23
(五) 地球放射性衰变能的时间效应	24
二、中子诱发裂变及诱发裂变能	26
(一) 中子诱发裂变核类的中子捕获截面	26
(二) 天然铀的中子诱发裂变及其裂变能	26
(三) 铀同位素丰度的变化	28
(四) U^{235} 的中子诱发裂变能	28
三、重核的自发裂变及自发裂变能	30
(一) U^{238} 与 Th^{232} 的自发裂变	30
(二) 超铀元素的自发裂变生成热	31
四、天然核转变能的演化特点	33
五、地球的热状态	34
(一) 地温与地表热流	34
(二) 地球内部的热状态	35
第四章 地球物质演化的时间历程与阶段特征	39
一、地球物质演化的时间历程	39
(一) 元素起源与元素年龄	39
(二) 元素形成至地球形成之间的时间间距	42
(三) 地球形成与地球物质分异的年龄	43
(四) 地壳的形成与发展的年龄	45
二、地球物质各演化阶段的一般特征	47
(一) 组成地球的原始物质及其熔融与分异	47

(二) 地幔熔融与地壳、大气圈、水圈的形成与演化阶段	50
第五章 核转变能与地球物质演化的多阶段性	52
一、地球物质中核转变能的一般特点	52
二、核转变能与元素形成后至地球形成前阶段的特点	54
三、地球形成至原始地壳形成期间的特点与核转变能	55
四、陆核的形成及硅铝壳的演化与增长阶段的特点与核转变能	56
五、硅铝壳的继续增长与演化阶段的特点与核转变能	60
六、地球物质演化与核转变能	60
七、核转变能与原始地球化学区的形成	63
第六章 核转变与地球物质组成的变异	65
一、天然核衰变对地球同位素组成变异的影响	65
二、重核的自发裂变与诱发裂变对地球的化学元素及 同位素丰度变异的影响	69
三、地壳矿物中的核反应	72
四、宇宙射线与地球及陨石物质产生的核反应	73
五、自然界超铀元素与超重元素的探索	75
(一) 自然界“缺失”元素的探索	77
(二) 自然界超铀元素镎(Np)、钚(Pu)、镅(Am)及锔(Cm)的探索	78
(三) 自然界超重元素的探索	81
结语	84
参考文献	85

第一章 地球演化的能源概述

地球的能源有外来能(宇宙能)和内生能。

地球的能量状态与能量平衡,可以从两个近于相互独立而又统一的系统来认识;其一是地表、大气圈、水圈及生物圈的能量转变与平衡区;另一是地球内部的能量转变与平衡区。我们称前者为外部系统,而后者为内部系统。

外部系统的能源主要依赖于宇宙能,内部系统的能源主要是地球的内生能,内外系统之间是有能量交换的,它们组成全面系统的演化过程。

外来能主要包括有太阳能——热核反应能;机械能——在重力场中和潮汐作用产生的各种机械能,陨石物质坠落至地面由于势能及动能所转变的热能;化学能——各种宇宙辐射与地球物质的电磁相互作用及辐射化学效应,各种宇宙能转变的化学能等。

内生能主要包括:地球物质中各种放射性核类的衰变、自发裂变、诱发裂变、光致裂变以及各种类型的核反应析出的能量——核转变能。地球由初始状态逐渐演化由于各种运动参量的改变所产生的机械能,地球内部物质在重力场中也会产生调整、流动,由于压力而导致的体积转变也产生各种机械能,地球物质中的各种化学过程、结晶作用等就产生化学能。

外来能对地表物质的地球化学演化起着主导作用,而地球物质的演化主要依赖于内生能。现分别概述各种主要能源在地球演化中的作用。

一、地球的外来能

1. 太阳能是热核反应能。太阳表面的温度约 6000°K , 太阳中心的温度甚至可以达到 $40 \times 10^6^{\circ}\text{K}$ 。为了求得太阳的总辐射能,在地球形成后的时期内太阳能的变化以及太阳能对地球内部热状态的影响,现作一简要分析。

若粒子产生热核反应,要求粒子间相互作用的最大距离 r 约为 10^{-11} 厘米,两荷电粒子 Z_1, Z_2 相对运动的动能

$$E = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r} e^2 \quad (1.1)$$

而当两核互相靠近时,相对运动的动能约为 3 KT

$$\therefore \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r} e^2 \approx 3 \text{ KT} \quad (1.2)$$

$$T = (1.5 - 2) \times 10^7 Z_1 Z_2^{\circ}\text{K} \quad (1.3)$$

T ——在该种核(Z_1, Z_2)能产生反应所要求的温度。

当 Z_1, Z_2 为质子时, $T = 1.5 \times 10^7^{\circ}\text{K}$ 时,大多数质子才可以接近到 10^{-11} 厘米的范围内,因此在太阳内及其表面,主要的反应有“质子-质子循环”。

$${}_1\text{H}^1 + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_1\text{H}^2 + e^+ + \nu \quad (1.4)$$

$${}_1\text{H}^1 + {}_1\text{H}^2 \longrightarrow {}_2\text{He}^3 + \gamma \quad (1.5)$$

$${}_1\text{H}^1 + {}_2\text{He}^3 \longrightarrow {}_2\text{He}^4 + e^+ \quad (1.6)$$

(1.6)式也可能是:

$${}_2\text{He}^3 + {}_2\text{He}^3 \longrightarrow {}_2\text{He}^4 + 2{}_1\text{H}^1 \quad (1.7)$$

由于在过程中氦核的寿期短,因此基本的过程是氢合成氦的过程.

$$4{}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_2\text{He}^4 + 2e^+ + 26 \text{ MeV} \quad (1.8)$$

这个过程所释放的能量 E 为:

$$E = (4 M_{\text{H}} - M_{\text{He}}) \times C^2 \quad (1.9)$$

(M_{H} ——氢原子质量为 1.00813 原子质量单位, M_{He} ——氦原子质量为 4.00386 原子质量单位, C ——光速).

一克氢转变为氦所放出的能量为 6.4×10^{18} 尔格. 假设太阳全部由氢组成, 太阳质量为 2×10^{33} 克, 放出总能量 1.28×10^{52} 尔格. 太阳总辐射能为 3.7×10^{33} 尔格/秒, 单位面积上的辐射是 6×10^{10} 尔格/厘米²·秒. 经计算太阳由质子合成氦的过程可延续 10^{11} 年, 因此在地球形成后的全部时间内太阳辐射能可看作恒定.

由氢合成氦的过程还有:

$${}_2\text{He}^3 + {}_2\text{He}^4 \longrightarrow {}_4\text{Be}^7 + \gamma \quad (1.10)$$

$${}_4\text{Be}^7 \longrightarrow {}_3\text{Li}^7 + e^+ + \nu \quad (1.11)$$

$${}_3\text{Li}^7 + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_2\text{He}^4 \quad (1.12)$$

而“碳氮循环”反应, 由反应的效果来看, 仍然是氢合成氦的过程.

$${}_6\text{C}^{12} + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_7\text{N}^{13} + \gamma \quad (1.13)$$

$${}_7\text{N}^{13} \longrightarrow {}_6\text{C}^{13} + e^+ + \nu \quad (1.14)$$

$${}_6\text{C}^{13} + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_7\text{N}^{14} + \gamma \quad (1.15)$$

$${}_7\text{N}^{14} + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_8\text{O}^{15} + \gamma \quad (1.16)$$

$${}_8\text{O}^{15} \longrightarrow {}_7\text{N}^{15} + e^+ + \nu \quad (1.17)$$

$${}_7\text{N}^{15} + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_6\text{C}^{12} + {}_2\text{He}^4 \quad (1.18)$$

总的看来是:

$$4{}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_2\text{He}^4 + 2e^+ + 26 \text{ MeV}$$

反应的延续时间约 6.5×10^6 年. 当 $T = 2 \times 10^7$ °K, 密度为 100 克/厘米³时, 碳氮循环能产生 100 尔格/克·秒的能量.

太阳辐射到空间的总能量约为 3.7×10^{25} 瓦, 但地球只接受到太阳能的 20 亿分之一. 其中地表吸收 $\frac{3}{4}$, 大气吸收 $\frac{1}{4}$, 这种能量引起了地球表面物质迁移、富集及各种生命过程的产生与发展. 太阳的辐射, 到达地球表面, 随着纬度的不同而有差异, 因而产生各种表生作用的纬度分带, 如气候、土壤、动植物和地表元素迁移、富集的分带. 可燃矿产的分布, 反映了地质历史时期地球接受太阳辐射变迁的规律.

太阳辐射热使地表产生周期性的温度变化, 这种变化对地内的影响, 用热传导方程计算证明向下渗透很浅. 若只考虑热量随深度的一维空间的变化, 热传导方程为:

$$c\rho \frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1.19)$$

c ——物质的热容, ρ ——物质的密度, k ——物质的热传导系数, $\frac{\partial u}{\partial t}$ ——某深度处温度随时间的变化, $\frac{\partial u}{\partial z}$ ——某时间内温度随深度的变化.

取
$$d = \frac{k}{c\rho}$$

那么(1.19)为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = d \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1.20)$$

方程式的解为:

$$u = A \cos(\omega t - \delta) \quad (1.21)$$

将(1.21)代入(1.20)得:

$$\begin{aligned} -A\omega \sin(\omega t - \delta) &= d \left[\frac{d^2 A}{dz^2} - A \left(\frac{d\delta}{dz} \right)^2 \right] \cos(\omega t - \delta) \\ &+ d \left[2 \frac{dA}{dz} \cdot \frac{d\delta}{dz} + A \frac{d^2 \delta}{dz^2} \right] \sin(\omega t - \delta) \end{aligned} \quad (1.22)$$

若使(1.22)左右部分相等,必须

$$\frac{d^2 A}{dz^2} - A \left(\frac{d\delta}{dz} \right)^2 = 0 \quad (1.23)$$

则

$$2 \frac{dA}{dz} \cdot \frac{d\delta}{dz} + A \frac{d^2 \delta}{dz^2} = -\frac{A\omega}{d} \quad (1.24)$$

温度的振幅是随着深度而减小, A 可写成

$$A = A(0) e^{-\lambda z} \quad (1.25)$$

$A(0)$ 是 $z=0$ 处的振幅.

$$\delta = \delta(0) + \lambda z \quad (1.26)$$

$\delta(0)$ 是 $z=0$ 处的 δ 值.

将(1.25)、(1.26)代入(1.24)得:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\omega}{2d}} \quad (1.27)$$

将(1.25)、(1.26)及(1.27)式代入(1.21)式,得:

$$u = A(0) e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2d}}} \cos \left[\omega t - \delta(0) - z\sqrt{\frac{\omega}{2d}} \right] \quad (1.28)$$

用富里哀级数表示,则:

$$\begin{aligned} u &= A_0 + A_1(0) e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2d}}} \cos \left[\omega t - \delta_1(0) - \sqrt{\frac{\omega}{2d}} z \right] \\ &+ A_2(0) e^{-z\sqrt{\frac{2\omega}{2d}}} \cos \left[2\omega t - \delta_2(0) - \sqrt{\frac{2\omega}{2d}} z \right] + \dots \end{aligned} \quad (1.29)$$

综上所述,可以看出:

- (1) 地球表面的温度作长期周期性的变化,其振荡的幅度随深度而按指数规律减小.
- (2) 振动周期 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 愈大,则温度变化的影响也愈深,影响的深度与振动周期的平

方根成正比。若周日温度变化可影响到地下 1.5 米处,则周年温度的变化也只能影响到 25—30 米之间。

(3) 根据(1.28)、(1.29)式可以看出,地表温度的长期变化,不影响地球内部的热状态。即使在冰期与间冰期的漫长时期内,地表平均温度的变化达到 40°C ,在 3 公里深处也只能引起 2°C 的变化。

目前我们人类活动所使用的各种固体、液体和气体的燃料,除核燃料外,从根本上来讲也可以说是在地质历史时期中被贮藏的太阳能。据 A. П. 维诺格拉多夫^[1]的计算,地球所得到的太阳热为 1.248×10^{24} 卡/年。1967 年人类所消耗的可燃性燃料产生的热约为 35.2×10^{18} 卡,只占地球接受太阳热的 0.0028%;即使预计到 1980 年人类对固体、液体和气体燃料的消耗有较大的增长,分别约为 23.12×10^{18} 卡、 29.6×10^{18} 卡及 15.92×10^{18} 卡,总共也只占地球接受太阳热的 0.0055%。

有些作者^[2,3]认为,太阳能是地球物质演化的间接主要能源。他们根据结晶化学及热化学的观点提出:物质的无机循环中,吸收能量及能量积累是在风化带中进行,而释放能量是在地壳内部进行,因此内力作用也是由太阳能所供给。他们证明:Al 和 O 及 Si 和 O 结合所形成的矿物和粘土类矿物,蕴藏有很大能量,这些矿物都不是地壳内部形成,而是在地表常温常压下形成。当铝和氧,硅和氧之间的键进行化学重结晶过程中进行地表能的吸收,沉积岩中这类矿物携带了大量能量进入地壳深部,当岩石受到变质作用及熔解再凝固而又放出能量。

太阳内的碳—氮循环,放出大量中微子,它们带出太阳能量的 7%,近地球处中微子达 7.4×10^{10} /厘米²·秒,但中微子使地球产生的能量极小。

2. 地球从原始的状态凝固到现在的状态,在这个过程中,可以产生 4×10^{39} 尔格^[4,5]或 2.5×10^{39} 尔格^[6]的重力能。但位能不能完全转变为地球内部所需要的热能。当地球凝固前的原始温度若为岩石的熔化温度(1400°C),那么地球的原始热能只能供应现在地表地温梯度变化的 $\frac{1}{4}$,只有在使地壳物质的温度扩散系数减小 60 倍或使原始温度增高至 5600°C 时,原始热才能供应热流所失散的热量。以地球的原始热作为地球演化的主要能源,与地球内部的热状态及越来越多的实际测量资料相矛盾。

3. 宇宙物质堕落在地球上的冲击动能所转变的热能,在地球演化中曾使表层物质产生一部分熔化、蒸发并向空间散发热量。陨石物质堕落在地球上所产生的能量可用下式^[7]计算:

$$4 \pi r^2 \sigma (T_s^4 - T_0^4) = \left(\frac{Gm}{r} + \frac{U^2}{2} \right) \frac{dm}{dt} \quad (1.30)$$

m ——落在地球上物质的质量,

r ——落在地球上物体的半径,

T_s ——表面温度,

T_0 ——地球周围的温度,

U ——近地球时物体的平均速度,

σ ——施捷方-波尔兹曼常数,

G ——引力常数。

地表温度的增长, 决定于 $\frac{dm}{dt}$ 的值。

$$\frac{dm}{dt} = \frac{4 r_e^2 (Q - m)}{P (R_2^2 - R_1^2)} \quad (1.31)$$

R_1, R_2 ——供给地球的陨石区的范围,

Q ——地球现在的质量,

P ——地球绕太阳的公转周期,

r_e ——地球质量增长的有效半径。

由于陨石物质的坠落使地球体积逐渐增大, 但使地表温度的增长大约能达到 350—400°K。虽然曾有假设地球有一个原始的由氧化物($\text{CO}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}$)组成的重大气圈, 这个大气圈不仅使坠落物体温度增高而且地面的热量很难辐射到空间去, 因此在地球物质积聚的过程中, 受到强烈的加热^[8]。

根据最近对陨石坑和月球环形山成因的研究与计算, 特别是通过以下四个方面对矿物的冲击变质作用的研究, 对陨石物质冲击地表产生的热效应, 提供了较可靠的参考资料。

(1) 对世界已知的几十个陨石坑中矿物的冲击变质作用的研究^[9]。如对直径约为 100—1000 米的亚利桑那(Arizona)陨石坑, 以及美国、非洲、澳大利亚、瑞典、芬兰等地的陨石坑和地面类似于月球环形山的直径大于 50 公里的特殊圆形构造的研究。对陨石坑中的矿物, 特别是石英、长石等受冲击作用下各种微结构和物性的变化进行了测定, 提供了冲击变质作用的物理化学环境图象。

(2) 在冲击波作用下(击波峰压由 0—70 万大气压), 研究石英、斜长石、钾长石、黑云母、角闪石、磁铁矿、锆英石、榍石、钛铁矿、金红石等物理参数和微结构的变化^[10, 11]。

(3) 地面及地下核爆炸弹坑与空腔的形成与演化过程、矿物及玻璃体的冲击变质与热变质作用的研究。

(4) 月岩矿物及玻璃体的冲击变质作用的研究^[12, 13]。

根据上述研究, 陨石物质坠落至地表, 在瞬时的冲击压力作用下, 矿物产生一系列的微结构变化, 矿物的物理参数发生变异。在小于 10 万大气压击波冲击下, 矿物的温度 < 1000°C; 而在 10—50 万大气压击波的冲击下, 温度可达 1000—1500°C。因此, 陨石物质坠落只能使地表的局部产生加热, 而对地球的热演化史不起重要作用。

4. 地球的弹性变形也能引起位能的变化。据计算^[14, 15], 潮汐作用在地球形成以后的时期内共产生 $(3-4) \times 10^{37}$ 尔格的能量, 这种能量仅有一部分在局部被地壳所吸收, 因而只能在地壳局部地区的热演化中起作用。

从上面的叙述中可以看出, 太阳所产生的能虽然很大, 但是被地球吸收的部分却非常的小, 而且影响的深度也很有限。其他的外部能源也只能影响地球的表面, 甚至是局部地区, 同时它们也不是经常恒定起作用的因素, 因而外来能不可能是地球物质演化的主要能源。

二、地球的内能

李四光同志对地壳运动进行了深湛的研究。他从地质力学的观点出发, 提出了“大陆

整块的运动和区域性或局部性的构造运动,一般都具有向西和向赤道方向移动的方向性……。产生这些体系的动力,起源于地球自转速度的变化。”为什么地球自转速度会发生变化呢?他认为“是内因为主的”。他对放射性物质引起地球内部的热过程,使地球内部物质产生对流、分异,使地球本身产生膨胀或收缩,从而使地球自转速度产生变化予以了特别的重视^[16]。

假设地球从一个比较单一的硅酸盐——金属系统中,经过熔融,物质调整等复杂的演化过程,发展到现在的状态,它所产生的能量约在 $n \times 10^{38}$ 尔格的范围内^[15,17-19]。在这种能量的供应条件下,相应可以使地球内部增高 2000°C ,而放射性衰变能足以使地球核部温度达 $5000-7000^{\circ}\text{C}$ 。究竟是什么能源可以产生 10^{38} 尔格数量级的能量呢?

组成地球的全部物质,设平均原子量为 30,化学键的平均强度为 6.3 电子伏,可以计算出全部地球所具有的化学能为 10^{39} 尔格^[20]。显然,地球物质不可能全部都转变为单原子状态,因而这种能量难以作为地球演化的主要内能。

地球及月球物质中的长寿期放射性同位素(K^{40} 、 U^{235} 、 U^{238} 、 Th^{232})衰变产生的能量,近三十年来许多学者根据放射性元素分布的不同方案,提出了各种地球演化的设想,并详细计算了衰变能^[19,21-35,36]。一般若以地球年龄为 4.5×10^9 年计算,长寿期放射性同位素的衰变能约为 $n \times 10^{38}$ 尔格。根据我们提出的放射性元素分布的设想,计算出现今地球物质长寿期放射性同位素衰变所产生的能量为 5.11×10^{20} 卡/年— 7.85×10^{20} 卡/年,平均约为 6.5×10^{20} 卡/年。由于放射性元素在地球形成后的不同时期含量不同,在距今 3×10^9 年前衰变成因热为现在的 5 倍。若地球年龄为 4.5×10^9 年,平均每年由于这种衰变析出的热量为 13×10^{20} 卡/年。在地球形成后到现在,由长寿期放射性同位素所产生的热量为 $(5.85-8) \times 10^{30}$ 卡,相当于 $(2.45-3.34) \times 10^{38}$ 尔格。这种能量足以使地球熔化^[37-39],由于能量的积累需要一段漫长的时间过程,地球物质的熔融、调整是带有局部性的,而在时间上也是断断续续的。

据我们计算,现在地壳岩石中所含的放射性元素产生的衰变成因热,平均在 $(0.9-1.8) \times 10^8$ 年内可使地壳岩石本身熔化,这与近期地壳运动的次级旋迴时间相适应。

地球的热失散途径很多,如地表热流的散热可达地壳放射衰变成因热的 $\frac{2}{5}$;火山活动失散热量约为 3×10^9 卡/秒仅仅是衰变成因热的 1%;地震波传播的能量根据 B. 古登堡^[40]的估计,年平均值约 10^{25} 尔格,即使达到 10^{27} 尔格/年的数量级也只占衰变产生能量的 1-2%;温泉散失的能量还不及衰变成因能的 0.1%。

在这里我们还没有考虑与计算中等寿期(10^6-10^8 年)放射性同位素的衰变能,它们在地球形成历史早期起过重要作用,甚至可以使地球核心全部熔融^[27,41]。在地球形成的最初阶段 Al^{26} 、 Cl^{36} 、 Fe^{60} 、 Np^{237} 、 Pu^{244} 、 Cs^{135} 、 U^{236} 、 Gm^{247} 、 Pd^{107} 、 I^{129} 及 Sm^{146} 等可以使原始地球(半径约 100 公里)增高温度达 3000°C ,以致全部熔融。

中子诱发裂变,在地球演化历史中具有重要意义,特别是 U^{235} 的诱发裂变甚至产生链锁反应,在 20 亿年前的地球演化中是主要的能源。

重核自发裂变能,特别在元素形成后及地球形成初期,对于那些自发裂变寿期与 α 衰变半衰期可以相竞争的核类来说,自发裂变能具有一定的意义。

看来,核转变能是地球物质演化的主要能源。

第二章 地球历史中天然核转变的类型

核转变按其产生的条件来看：一种是在地球发展过程中自发的矛盾形式，一种是受外因条件所激发的。为了要了解究竟有哪些核类可以对地球形成以后的演化过程提供影响，这首先需要分析各种核类天然核转变的速度，也就是衰变和自发裂变的半寿期。然后要知道选择出来的有可能对地球演化的能源提出贡献的核类在地球形成时以及现在的丰度。只有这样才能根据它们的半衰期，丰度和具体所处的物理-化学环境，来初步估计在地球发展的不同时期，核转变能源的类型、规模和可能产生的影响。

一、放射性核类按衰变半衰期的分类及自发裂变核类的半寿期

半衰期是放射性核的重要特征，它确定了这种核的寿命长短。天然放射性核类的半衰期值的变化范围很大，可以从若干千分之一秒到几十亿年，很显然，有一部分放射性核类，因为半衰期短，在地球形成以前就死掉了。另外还有一部分放射性核类由于半衰期特别长，在目前地球年龄的范围内所起的作用很小，可完全忽略。仅有一部分半衰期为 10^6 — 10^{10} 年之间的核类在地球演化与存在的年代中起作用。现将这些核类列于图 1 中。

从图 1 可以看出，半衰期为 10^6 — 10^{10} 年间的核类约有 20 个，其中半衰期 $< 10^8$ 年的核类，主要是镥系，只在元素形成后或地球形成的初期阶段起作用；半衰期大于 10^8 年而小于 5×10^9 年的核类，它们参加了整个地球演化的过程，有些目前仍然在起重要作用，如

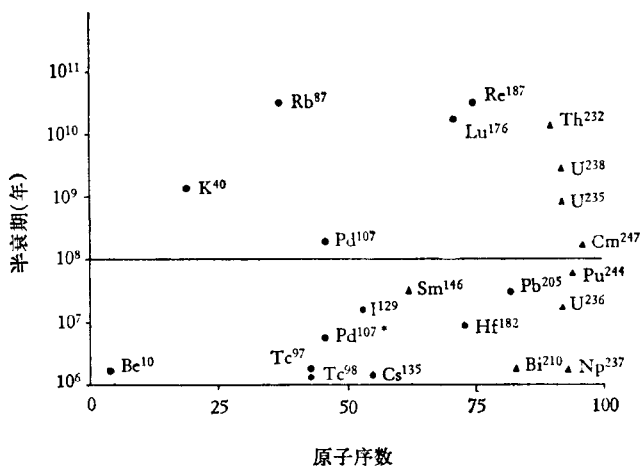


图 1 放射性核类按衰变半衰期的分布图

▲——α衰变核类；•——β衰变核类；*——Pd¹⁰⁷半衰期 7×10^8 年。

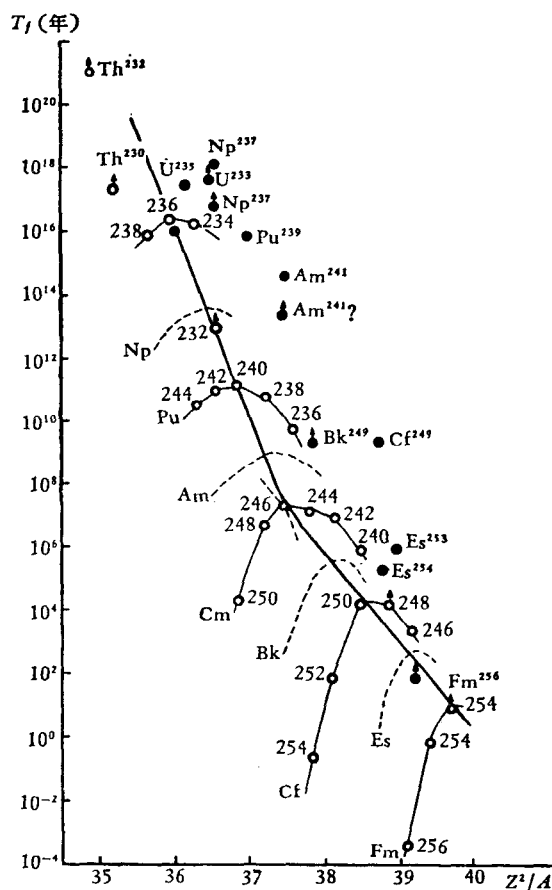


图 2 自发裂变半寿期 T_f 与参数 Z^2/A 的关系

可以再细分为二类：一类是 10^7 年 $< T_f < 5 \times 10^{10}$ 年，一类是 $T_f > 10^{16}$ 年。很显然后者因为 T_f 太长，所以自发裂变不可能对地球的发展起什么特殊的作用。而第一类只有二个核 Pu^{244} 和 Gm^{247} ，虽然它们 α 衰变的半衰期都比较短，但是对地球初期的发展自发裂变还是起了一定的影响。

表 1 重核自发裂变半寿期

元 素	原 子 量	自 发 裂 变 半 寿 期 T_f (年)	α 衰 变 半 衰 期 T_α (年)
Th	232	1.4×10^{18}	1.45×10^{10}
U	235	1.9×10^{17}	(7.53×10^8) (7.13×10^8)
	236	2×10^{18}	2.39×10^7
	233	4×10^{16}	4.5×10^9
Np	237	$\geq 4 \times 10^{16}$	2.2×10^8
Pu	244	2.5×10^{10}	7.6×10^7
Gm	247	6×10^8	2.5×10^8 $(> 9 \times 10^7)$

对目前已知的放射性核类的半衰期和自发裂变半寿期的综合分析结果表明，有下列

U^{238} 、 U^{235} 、 Gm^{247} 及 K^{40} 等；半衰期大于 5×10^9 年的核类，在地球历史中其丰度变化不大，如 Th^{232} 、 Re^{187} 、 Lu^{176} 、 Rb^{87} 。很显然，从研究地球演化历史的角度出发，特别值得注意和研究的核类是半衰期为 10^8 — 5×10^9 年的核类。

天然自发裂变核类的半寿期，比 Re 更重的核，一般都有产生自发裂变的可能。偶-偶核的自发裂变半寿期和 Z^2/A 之间存在着有规律的联系(图 2)。

偶-偶核的自发裂变半寿期随着 Z^2/A 值的增加而呈指数性的减少。奇核的自发裂变半寿期要大得多，但未发现任何系统性。但是凡具有自发裂变特性的核，同时又是 α 衰变体，所以在考虑它们对地球演化的贡献时，应该同时考虑这二种天然核转变的半衰期。从上边对衰变半衰期的分类中可以看出，具有自发裂变特性的核当中只有 Gm^{247} 、 Pu^{244} 、 Np^{237} 、 U^{238} 、 U^{236} 、 U^{235} 及 Th^{232} 等七个核具有足够长的 α 衰变半衰期。现把它们 T_α 和 T_f 分别列于表 1。

从表 1 中可以看出这七个核的 T_f 还

七个核类应该给予特别的注意: Gm^{247} 、 Pu^{244} 、 U^{235} 、 U^{238} 、 Th^{232} 、 Pd^{107} 、 K^{40} 。

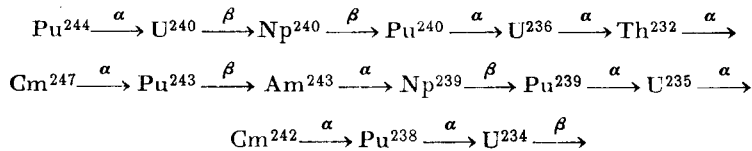
二、核类的原始丰度

上述根据衰变和自发裂变半衰期所选择出来的核类只能启示我们有哪些核类可以在地球演化过程中起作用,但不能解决作用的规模问题。为了了解这一点就需要知道这些核类的原始丰度和在地球演化过程当中它的丰度变化。原始丰度,目前尚还无法直接进行测定。近年来曾经有些学者根据它们提出来的元素形成理论进行过原始丰度的计算,虽然不能认为完全确实,但在一定程度上是反映了客观的情况。现在把 E. M. 布尔比吉 (Burbidge)^[42]的计算结果列于表 2。

表 2 某些核类的原始丰度

核 类	K^{40}	Pd^{107}	Th^{232}	U^{235}	U^{238}	Pu^{244}	Gm^{247}
丰度 ($\text{Si}=10^6$)	0.38	0.072	0.084	0.057	0.110	0.157	0.103

一般认为自然界存在着三个天然放射系 ($4n$, $4n+2$, $4n+3$) 和一个人工放射系。根据近年来的研究,在地壳岩石矿物中、在月岩和陨石中,发现了一系列比 Th^{232} 、 U^{235} 和 U^{238} 更重的母体同位素。如:



至于镱系,在自然对象中也发现有痕量存在。

宇宙化学的研究资料提出在大规模元素形成的末期曾经产生过大量的超铀元素,可以一直到 Cf^{254} 甚至 $Z=114$, $A=298-300$ 的元素^[44-47]。某些超铀元素是短寿命的 α 衰变体和自发裂变体,因而在它们生成之后,很快就会按不同的途径向轻的核衰变或裂变。而 $Z=110$, $A=294$ 及 $Z=114$, $A \approx 300$ 的核类半衰期可达 10^8 年^[47], 其结果是不仅它们本身对地球演化的能源起作用,而且还导致某些具有长寿命半衰期的核成倍地增长。

在上边讨论天然自发裂变核类的半衰期时就已经提到过如下的规律: 偶-偶核的自发裂变半寿期随 Z^2/A 值的增加而指数性的减少,奇核则具有大的多的裂变半寿期,但未发现任何系统性。因而 U^{235} 的母核, α 衰变的几率比裂变的几率要大,所以这些母核的丰度实质上主要是通过 α 衰变的方式迭加在 U^{235} 的原始丰度上。同样的情况在 Th^{232} 和 Np^{237} 上也有类似的表现。

在形成超重元素的过程中,长寿期的超重核的产额据计算如表 3 所列。

由于超重核产生 α 衰变及自发裂变,而特别是超重核的 α 衰变也会使 U^{235} , Th^{232} , Np^{237} , U^{238} 以及 Pu , Am , Gm 等元素及同位素的丰度增长。

由于超铀元素的衰变使 U , Th , Np 的丰度相应增高,具体增高的情况如表 4。

元素形成时: $\text{U}^{235}/\text{U}^{238} = 0.663/0.405 = 1.64$ ^[42] 或 1.97 与 1.80^[47]

表 3 γ -过程形成的超重核^[17]

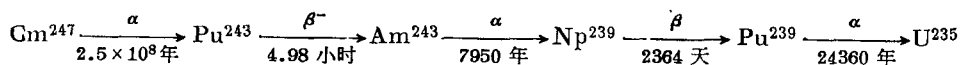
Z	A	半衰期(年)	占优势的衰变	元素形成时核类的丰度 (Si=10 ⁶)	
				K=1.79	K=2.3
110	294	10 ⁸	α	0.030	0.008
113	297	10 ⁵	α	0.069	0.010
111	293	10 ⁵	α	0.109	0.040
112	295	10 ⁴	α	0.087	0.029
112	296	10 ⁴	α	0.042	0.002
110	291	10 ⁴	α	0.126	0.068
110	292	10 ³	自发裂变	0.068	0.022
112	294	10 ³	α	0.025	0.000
Th ²³² 0.0812 Th ²³² /U ²³⁸ =1.78					
Np ²³⁷ 0.0853 Pu ²⁴⁴ /U ²³⁸ =0.88					
Pu ²⁴⁴ 0.0401 U ²³⁵ /U ²³⁸ =1.97 或 1.80					
U ²³⁸ 0.0455 Np ²³⁷ /U ²³⁸ =1.87 或 1.70					
U ²³⁵ 0.0897					

表 4 各种重核对 Th²³², Np²³⁷, U²³⁸ 及 U²³⁵ 原始丰度的贡献^[42]

半衰期	Th ²³² (4n) 1.45 × 10 ¹⁰ 年		Np ²³⁷ (4n+1) 2.2 × 10 ⁶ 年		U ²³⁸ (4n+2) 4.6 × 10 ⁹ 年		U ²³⁵ (4n+3) 7.13 × 10 ⁸ 年	
	质量数 A	丰度 (Si=10 ⁶)	质量数 A	丰度 (Si=10 ⁶)	质量数 A	丰度 (Si=10 ⁶)	质量数 A	丰度 (Si=10 ⁶)
	232	0.084	237	0.057	238	0.110	235	0.057
	236	0.057	241	0.221	242	0.157	239	0.110
	240	0.110	245	0.103	246	0.103	243	0.157
	244	0.157	249	0.139	250 (25%)	0.035	247	0.103
	248	0.139	253	0.097			251	0.097
	252 (97%)	0.094					255	0.139
总的丰度	5.97	0.641	5.0	0.617	3.25	0.405	6	0.663

$$\text{Th}^{232}/\text{U}^{238}=0.641/0.405=1.58^{[42]} \text{ 或 } 1.78^{[47]}.$$

我们仅以 Gm²⁴⁷ 对提高 U²³⁵ 丰度的影响作一简要分析。前面已经提到 Gm²⁴⁷ 形成 U²³⁵ 的途径如下:



根据元素形成的理论,由表 3、4 可以看出超铀元素的原始丰度可以与铀钍的原始丰度达到相同的数量级。

Gm²⁴⁷ 是 α 衰变体。H. 戴芒特^[48] 用强中子流照射 Pu 产生的 2 毫克 Gm²⁴⁷ 测量了它的半衰期。根据是在已知时间内 Gm²⁴⁷ 可以衰变产生多少 Pu²⁴³。为了能够得到 Pu²⁴³ 开始生长的准确时间和把在已知时间内生长出来的 Pu²⁴³ 分离出来,作者使用了放射化学纯化和分离的方法。根据 Pu²⁴³ 的半衰期和射线能量,用多道 γ - β 符合测量的方法测定了 Pu²⁴³ 的含量。结果表明: Gm²⁴⁷ 半衰期的下限是 4×10^7 年,上限可达 9×10^7 年。

B. B. 契尔登采夫等^[49] 用 α 谱和 α - γ 符合谱测量的方法直接在天然对象标本中进行了找寻 Gm²⁴⁷ 的工作。结果在上新生代的辉钼矿和上旧石器时代的骨化石中找到了