



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

核能发电原理

马 进 王兵树 马永光 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

核能发电原理

编 著 马 进 王兵树 马永光
主 审 赵福宇



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书介绍了压水堆核电站的发电原理、控制方法、运行过程、核辐射防护的基本知识。全书分为五章，分别介绍核裂变反应与发电原理，一回路系统及主要设备，反应堆控制原理和方法以及运行中的有关现象，反应堆启动停堆过程中的标准状态及主要操作过程，核电站的辐射防护。

本书可作为高等学校本专科能源动力类专业的选修课教材，也可以作为核电站的入门读物，供大学高年级学生自学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

核能发电原理/马进等编著. —北京：中国电力出版社，2007

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 4872 - 8

I. 核... II. 马... III. 核能发电—高等学校—教材 IV. TM613

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 122714 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 1 月第一版 2007 年 1 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 2.125 印张 50 千字 4 彩页

印数 0001—3000 册 定价 5.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

前 言

核能发电是我国能源战略的组成部分之一,在能源供应总量中的比例正在逐步提高。今后核能发电将在电力工业中占有重要地位。

核电站涉及到核反应堆物理、热工水力学、金属材料、辐射防护、过程控制等多个学科,涉及面广,综合性强。现有教材和专业书籍大多为培养核能专业技术人员所编写,核反应堆物理、热工水力学、核反应堆运行等方面的教材篇幅量大,专业知识深,教学所需课时多。本书的编写主要是为便于非核能专业的学生学习核电站知识。目前世界上大多数商用核反应堆是压水堆,因此我们以压水堆核电站作为介绍内容。

全书共分为五章。第一章介绍核裂变基础知识,包括放射性与核反应、裂变反应与链式裂变反应;第二章讲述核电站一回路的主要设备和系统,如反应堆、蒸汽发生器、稳压器、化学和容积控制系统等;第三章介绍核反应堆反应性控制方法与运行中反应性的变化;第四章讲述反应堆的标准状态、启动停堆过程中的主要操作过程;第五章介绍核辐射防护的有关知识。

本书第一、第二和第五章由马进编写,第三章由马永光编写,第四章由王兵树编写。西安交通大学赵福宇教授认真仔细地审阅本书,并提出许多宝贵的意见和建议,在此编者表示衷心的感谢。

本书第一作者曾经在大亚湾核电站工作学习过一段时间,得到大亚湾核电站模拟机维修科与管理科的各位同事、模拟机教练员们的关心和指导,他们对本书的编写提供很大帮助,在

此深表谢意。

由于编者水平有限，教学和工程实践经验不足，书中不妥甚至错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2006 年 1 月

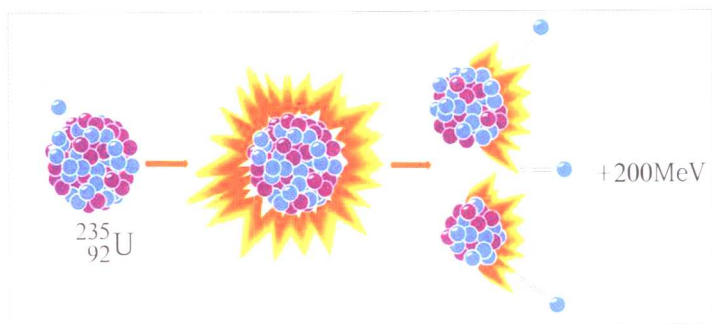


图 1-4 裂变过程的示意图

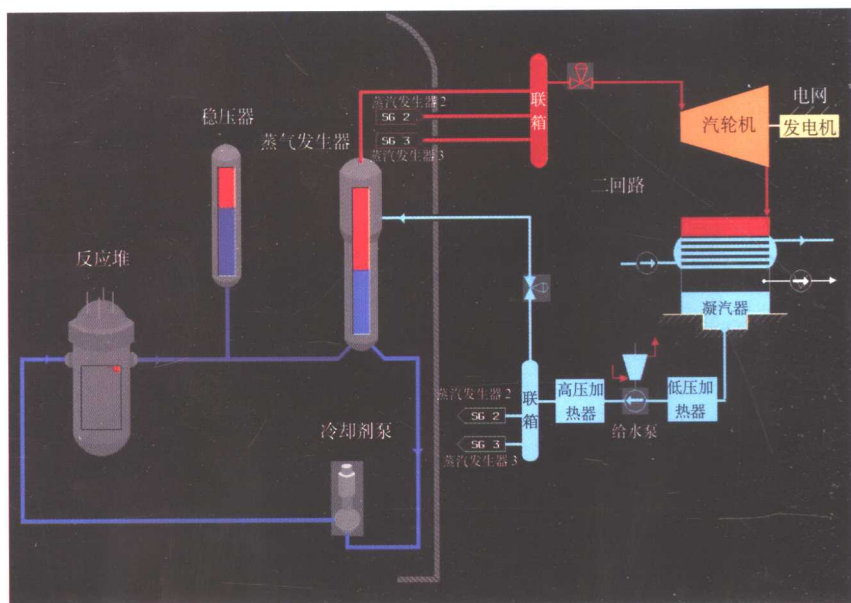


图 2-1 一回路、二回路系统原理流程

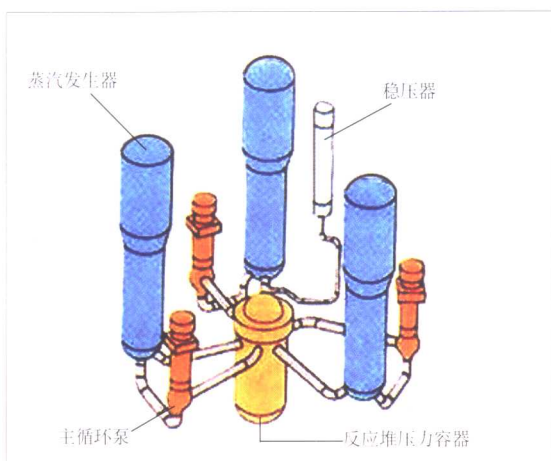


图 2-2 一回路的三个环路

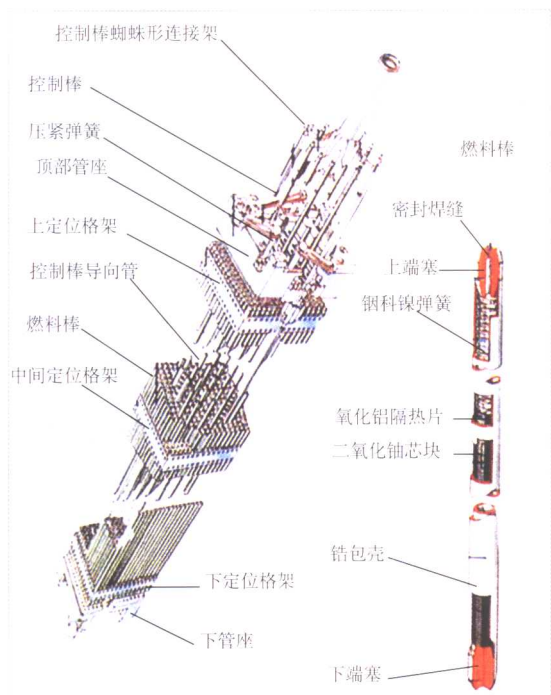


图 2-4 燃料棒组示意图

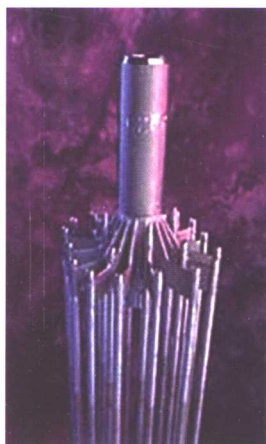


图 2-5 控制棒组示意图

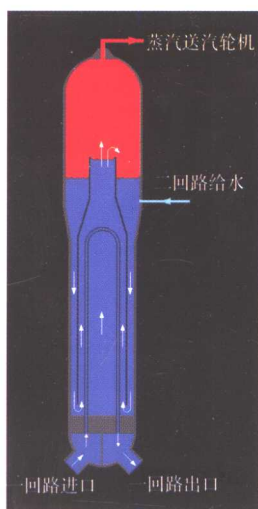


图 2-6 蒸汽发生器结构

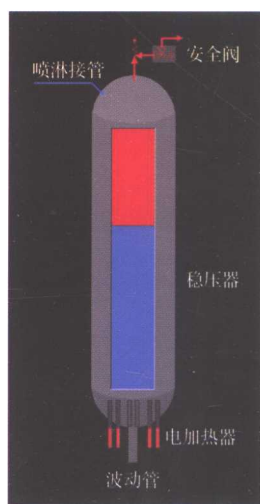


图 2-7 稳压器结构

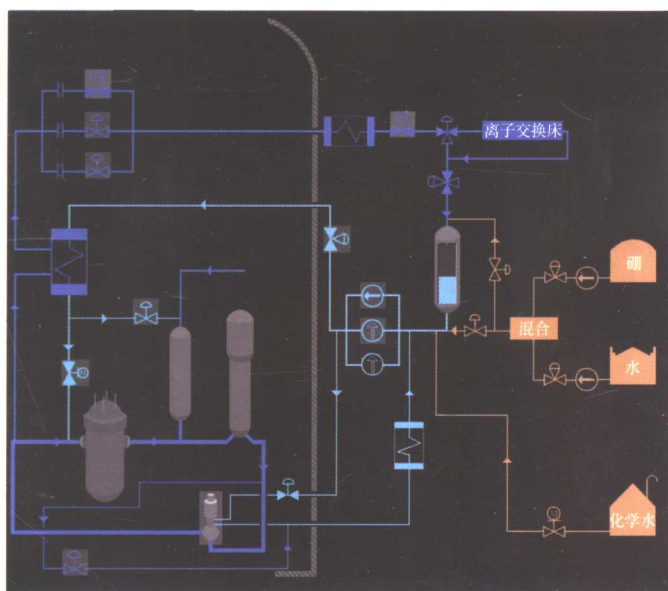


图 2-8 化学和容积控制系统示意图

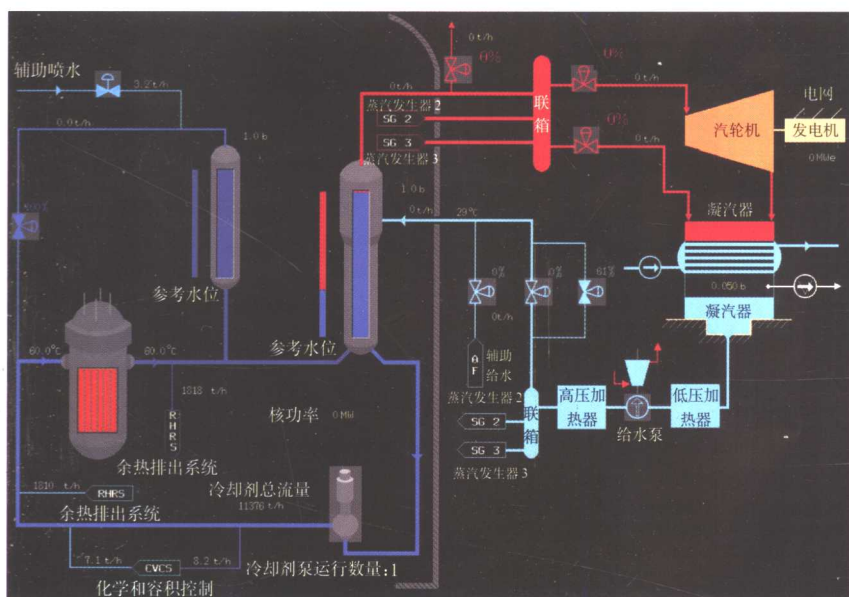


图 4-3 冷停堆一回路状态

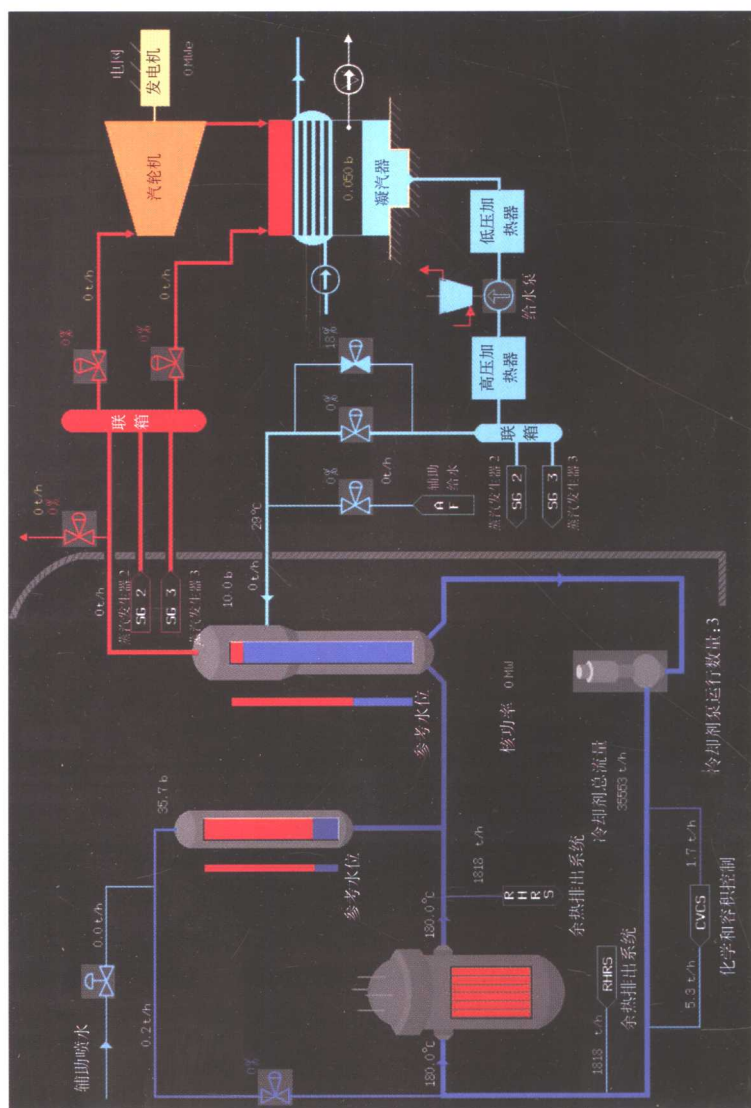


图 4-4-4 两相停堆—回路状态

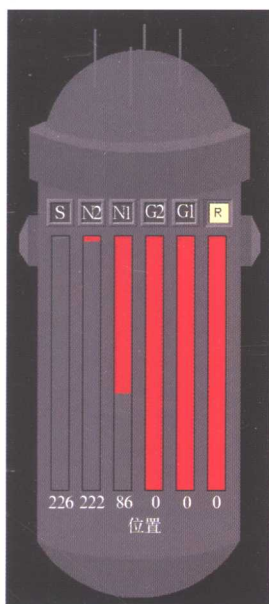


图 4-5 热停堆状态
控制棒位置

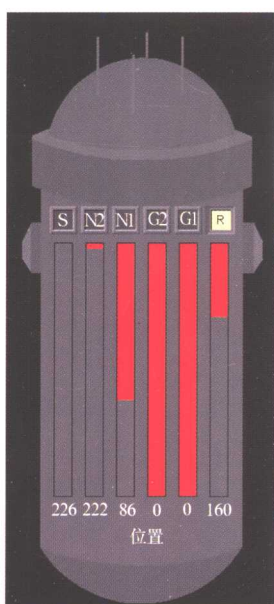


图 4-7 临界状态控制
棒位置

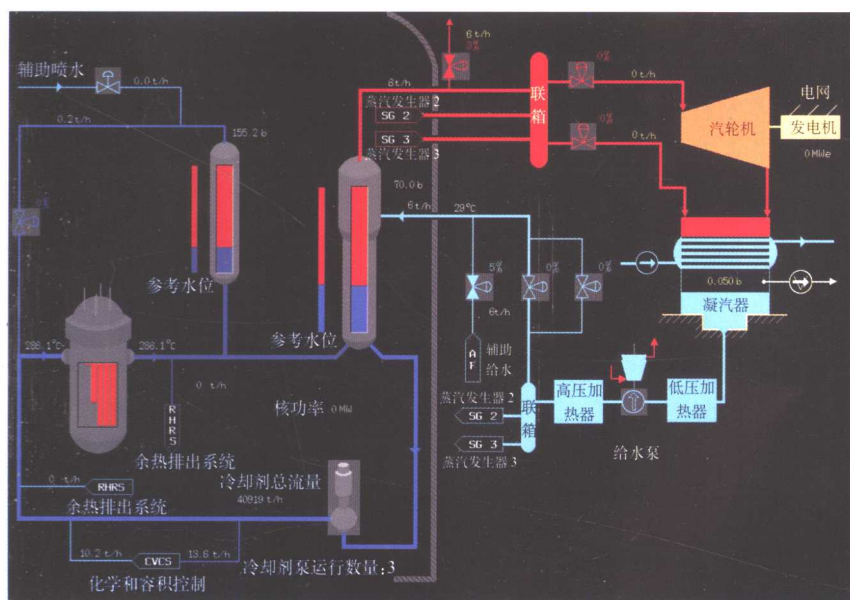


图 4-6 一回路热停堆状态

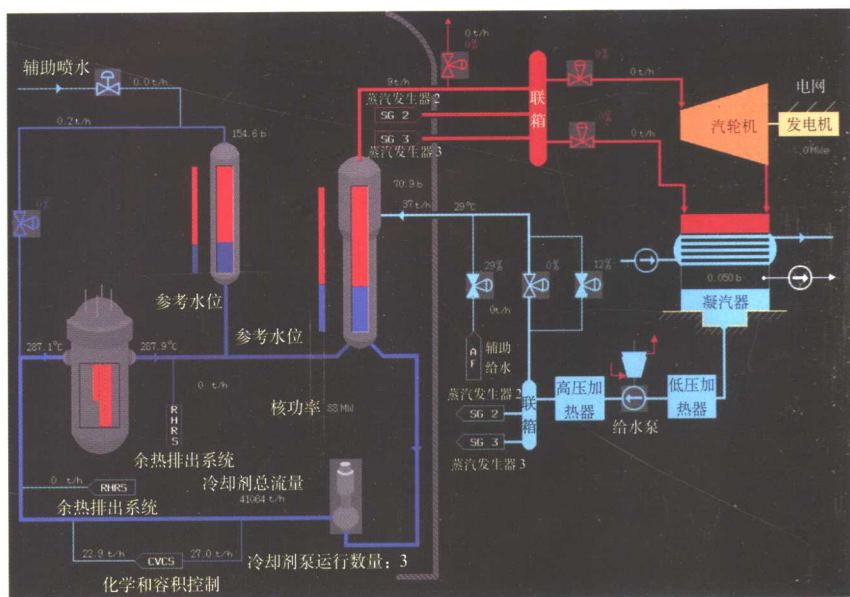


图 4-8 2% 额定功率下一回路冷却剂温度、压力和流量

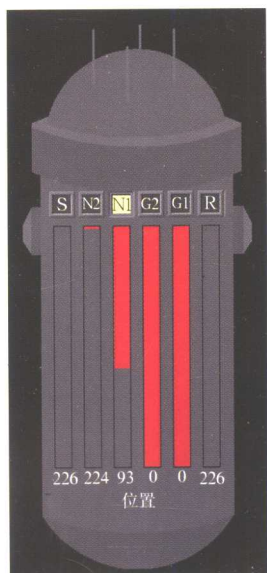


图 4-9 2% 额定功率状态下控制棒位置



图 4-10 100% 额定功率时控制棒位置

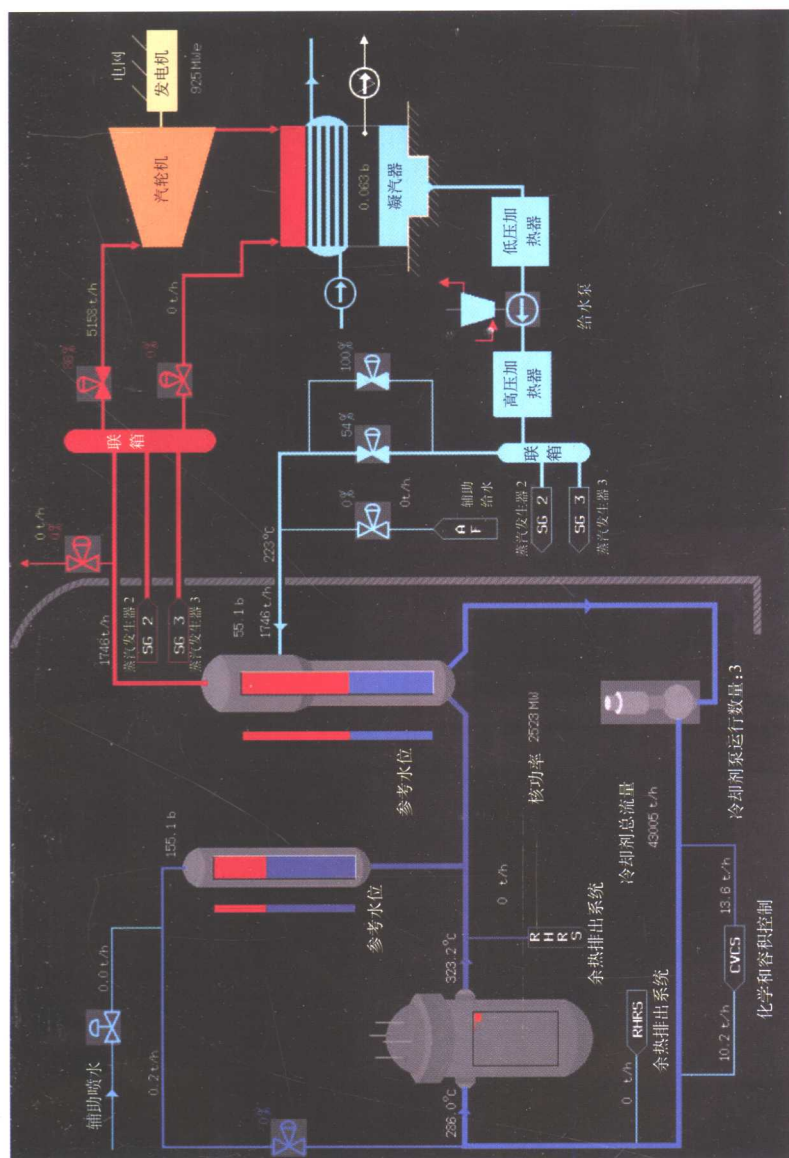


图 4-11 100%额定功率时一回路状态

目 录

前言

第一章 核裂变基础知识	1
第一节 原子与原子核	1
第二节 放射性与核反应	4
第三节 裂变反应	6
第四节 链式裂变反应	8
第二章 核电站系统和设备	14
第一节 压水堆核电站概述	14
第二节 一回路系统主要设备	17
第三节 一回路的辅助系统	23
第三章 核反应堆控制	26
第一节 反应性和中子倍增时间	26
第二节 反应性控制方法	29
第三节 运行过程中反应性的变化	31
第四节 氙和钐效应	32
第五节 反应性平衡	39
第四章 核电站运行	40
第一节 核电站运行特点	40
第二节 核电站启动和停堆过程	42
第五章 核电站的辐射防护	48
第一节 辐射的危害性	48
第二节 核电站放射性来源	54
第三节 核电站的安全防护措施	56
第四节 放射性防护的一些知识	60
参考文献	61

第一章 核裂变基础知识

第一节 原子与原子核

一、原子

物理实验证明,物质是不连续的。将某一种物质分成越来越小的颗粒时,会有保持这种物质化学性质而不能再分的时候。这些仍然具有单质化学物质的最小颗粒称之为原子。

原子由一个原子核与围绕原子核不断旋转运动的电子组成。见图 1-1。原子核带正电,每个电子带一个单位负电荷(电量约等于 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$)。原子核带的正电荷在数量上等于外围电子所带负电荷的总和,由于正负符号相反,作用相互抵消,因此原子呈中性。

原子的直径约为 10^{-8}cm (指电子轨道的直径,假定为球形)。原子核的直径为 10^{-12}cm 。

二、原子核

原子核是由更小的核子构成的紧密整体。核子分为两类:一类是中子(用符号 n 表示),不带电,呈电中性;另一类是质子,带一个单位正电荷(用符号 p 表示)。除了普通氢原子核只有一个质子外,其他所有物质的原子核既包含质子又包含中子。

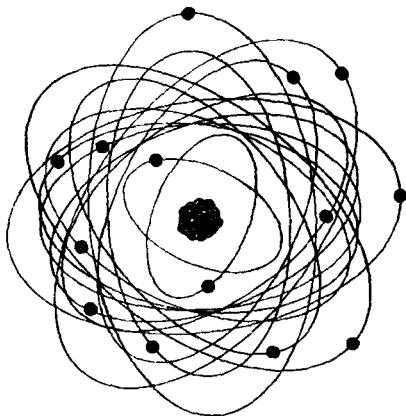


图 1-1 原子的结构

各种物质原子核中的质子或者中子数目的不同决定了它们原子核特性的不同。

三、质量数和原子序数

原子核中质子与中子的总数 A 称为原子核的质量数，原子核中的质子数称为原子序数，常用 Z 表示。

四、同位素

元素的化学性质由原子核中的质子数决定，而不是由原子量决定。即使核内包含的中子数目不一样，但包含的质子数目相同的原子都认为是同一种元素。将具有相同的质子数而不同中子数的同一种元素的几种原子称为同位素。

在人们已知的一百多种化学元素中，有 1500 多种不同的原子核，其中 300 种是稳定的同位素，1200 种是放射性同位素。

现有的核电站中，铀是重要的元素，其在自然界中至少存在三种不同同位素，质量数分别为 234, 235, 238。其中 ^{238}U 含量最丰富，约为 99.28%， ^{235}U 含量约为 0.71%， ^{234}U 含量非常少。由于同位素的化学性质一致，所以一般不能用化学方法区别各种同位素，只能用物理方法或核物理方法将它们分开。反应堆中所使用的核燃料中， ^{235}U 的含量约为 3%，铀的浓缩是通过离心法完成的。

五、核的结合能

当一定数量的质子和中子聚合起来组成一个新原子核后，新原子核的质量小于组成它的核子的质量总和，这种质量差异，称为原子核的质量亏损。这些减少了的质量，以能量的形式释放出来。根据爱因斯坦相对论中的质量和能量之间的关系，质量亏损相当于系统能量的变化：

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (1-1)$$

式中： c 是光在真空中的速度， m/s ； ΔE 为能量的变化， J ； Δm 为质量亏损， kg 。

在研究原子时，习惯用电子伏特表示能量。1 电子伏特（即

1eV) 表示任意一个带单位电子电荷的粒子不受阻碍地通过 1V 电势所获得的能量。根据已知的电子电荷大小可以计算得到:

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (1-2)$$

由于 1eV 太小, 所以常用百万电子伏特 (MeV) 作为单位, 即 10^6 eV 。

打破一个原子核, 将每个核子分开, 所吸收的能量等于质量亏损的能量。与质量亏损相当的能量称为原子核的结合能。所有已经比较精确测定了同位素质量的元素, 其结合能都已经计算出来。元素的平均结合能等于总的结合能除以原子核质量数, 如图 1-2 所示。从图中可以看到, 除了几个轻核外, 其他元素的平均结合能极为接近。质量数在 90 左右的原子核具有最大平均结合能, 因此最为稳定。如果将很轻的原子核转变为较重的原子核, 则质量亏损比原有的原子核多, 增加的质量亏损对应着能量的释放, 这就是核聚变反应; 同样, 将很重的原子核分裂成较轻的原子核, 同样可以释放出能量, 这就是核裂变反应。目前核反应堆中应用的就是核裂变原理。

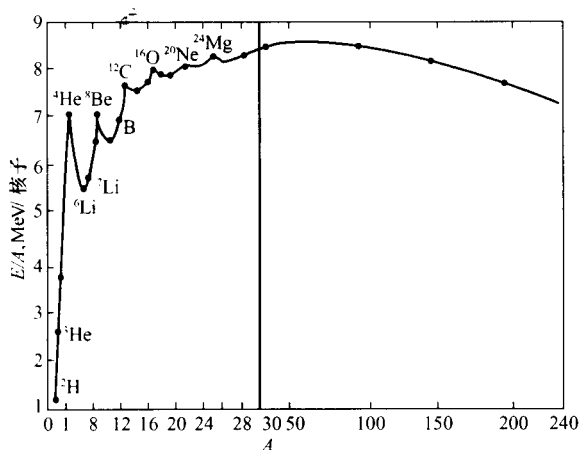


图 1-2 元素的平均结合能