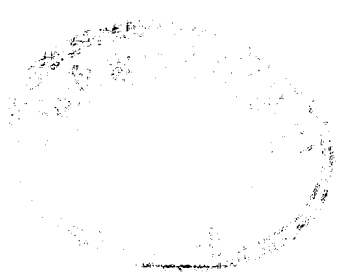


WWER-1000 核电站 基础知识

主 编 蒋国元

副主编 顾颖宾



原子能出版社

中国核工业集团公司 核电培训教材编审委员会

总 编 孙 勤
副 总 编 余剑锋 叶奇蓁

编辑委员会

主 任	陈 桦				
副 主 任	程慧平	王光银			
编 委	马明泽	刘志勇	刘明章	李苏甲	李和香
	吴美景	邹正宇	杨树录	段光荣	顾颖宾
	商幼明	戚屯锋	缪亚民		

执行编委

谢 波	马寅军	叶丹萌	莫银良	高小林
吴向东	阮良成	唐锡文	蔡黎勇	刘 朔
肖 武	浦胜娣	刘玉山		

编委会办公室

姜福明	朱 黎	程建秀	黄 芳	方朝霞
宫育锋	章 超	丁怀兰	陈茂松	万德华
张曰智	郭维贺			

《WVER-1000 核电站基础知识》

编 辑 部

主 编 蒋国元

副 主 编 顾颖宾

编 者 李 锋 骆纯珊 钱纪生 廖江龙

审 查 王宇宙 刘海涛 周 萍 姚进国 骆纯珊

统 审 毛正宥 丁卫东 申中祥 陆 凡

总 序

核工业作为国家高科技战略性产业,是国家安全的重要基石、重要的清洁能源供应,以及综合国力和大国地位的重要标志。

1978 年以来,我国核工业第二次创业。中国核工业集团公司走出了一条以我为主发展民族核电的成功道路。在长期的核电设计、建造、运行和管理过程中,积累了丰富的实践和理论经验,在与国际同行合作过程中,实现了技术和管理与国际先进水平相接轨,取得了骄人的业绩。

中国核工业集团公司在三十多年的核电建设中,经历了起步、小批量建设、快速发展三个阶段。我国先后建成了秦山、大亚湾、田湾三大核电基地,实现了我国大陆核电“零”的突破、国产化的重大跨越、核电管理与国际接轨,走出了一条以我为主,发展民族核电的成功之路。在最近几年中,发展尤为迅猛。截至 2008 年底,核电运行机组 11 台,装机容量 907.82 万千瓦,全部稳定运行,态势良好。

进入新世纪,党中央、国务院和中央军委对核工业发展高度重视、极为关怀,对核工业做出了新的战略决策。胡锦涛总书记指出:“无论从促进经济社会发展看,还是从保障国家安全看,我们都必须切实把我国核事业发展好”。发展核电是优化能源结构、保障能源安全、满足经济社会发展需求的重要途径。2007 年 10 月,国务院正式颁布了《核电中长期发展规划(2005—2020 年)》。核电进入了快速、规模化、跨越式发展的新阶段。

在中国核电大发展之际,中国核工业集团公司继续以“核安全是核工业的生命线”的核安全文化理念和“透明、坦诚和开放”的企业管理心态,以推动核电又好又快又安全发展为己任,为加速培养核电发展所需的各类人才,组织核电领域专家,全面系统地对核电设计、工程建造、电站调试、生产准备和生产运营等各阶段的知识进行了梳理,构造了有逻辑性、系统性的核电知识体系,形成了覆盖核电各阶段的核电工程培训系列教材。

这套教材作为培养核电人才的重要工具,是国内目前第一套专业化、体系化、公开出版的核电人才培养系列教材,有助于开展培训工作,提高培训质量、节约培训成本,夯实核电发展基础。它集中了全集团的优势,突出高起点、实用性强,是集团化、专业化运作的又一次实践。是中国核工业 50 余年知识管理的积淀,是中国核工业 10 万人多年总结和实践经验的结晶。

21 世纪是“以人为本”的知识经济时代,拥有足够的优秀人才是企业持续发展的重要基础。中国核工业集团公司愿以这套教材为核电发展开路,为业界理论探讨、实践交流提供参考。

我们要继续以科学发展观为指导,认真贯彻落实党中央、国务院的指示精神,积极推进核电产业发展。特别是要把总结核电建设经验作为一项长期的工作来抓,不断更新和完善人才教育培训体系。

核电培训系列教材可广泛用于核电厂人员培训,也可用于核电管理者的学习工具书,对于有针对性地解决核电厂生产实践和管理问题具有重要的参考价值。

中国核工业集团公司总经理



2009 年 9 月 9 日

前 言

随着中国核电的快速发展,核电人才的需求也日益增长。为了配合中国核工业集团公司(简称中核集团公司)系统化、正规化的全员培训工作,提高培训质量,提高员工的核安全文化意识;为中核集团公司的发展夯实基础,江苏核电有限公司培训中心按照中核集团公司核电培训教材编审委员会的要求,组织公司内有丰富理论知识和实践经验的专业技术人员共同编写了 WWER-1000 压水堆核电站基础知识系列培训教材。

本系列教材共三册,分别是:《WWER-1000 核电站基础知识》(第一分册)、《WWER-1000 核电站设备与系统》(第二分册)和《WWER-1000 核电站机械与电气》(第三分册)。

本系列教材参考了田湾核电站操纵员理论培训教材的架构与内容,本着理论联系生产实际的原则,以核电厂有效运行规程、调试程序及系统设计文件等为依据,采用图文并茂的形式讲解 WWER-1000 压水堆核电机组相关基础知识,内容体现了《核电厂操纵人员执照考核》(中华人民共和国核行业标准 EJ/T1043—2004)所要求的知识点,文字通俗易懂,是一套适用性、针对性较强的技术培训教材,适合于核电厂运行人员理论培训,亦可作为压水堆核电站其他工程技术人员及承包商的参考资料。

参与《WWER-1000 核电站基础知识》编审的人员为:

第一章,核物理和反应堆物理基础知识,由钱纪生编写,骆纯珊,刘海涛审;

第二章,压水堆核电站热工水力,由骆纯珊编写,姚进国审;

第三章,KKS 编码和电站实体保卫,由廖江龙编写,周萍审;

第四章,核电站水化学,由李锋编写,王宇宙审。

本分册的内容由武汉核动力运行研究所统审。

在本分册的编写过程中得到了江苏核电有限公司总经理部、技术支持处、运行处和培训中心的大力支持,在此谨一并表示诚挚的谢意。

本教材疏漏或不妥之处在所难免,敬请读者批评和指正。

江苏核电有限公司

2009 年 8 月

目 录

第一章 核物理和反应堆物理基础知识

1.1 概述	1
1.1.1 核电工程要解决的三大问题	1
1.1.2 压水堆核电站是怎样工作的	2
1.2 原子物理和核物理	3
1.2.1 物质原子性质	3
1.2.2 质量亏损和结合能	6
1.2.3 放射性衰变方式	8
1.2.4 放射性	11
1.2.5 中子与核的相互作用	13
1.2.6 裂变中释放的能量	14
1.3 反应堆理论:中子特性	18
1.3.1 核截面和中子注量率	18
1.3.2 反应率	22
1.3.3 中子慢化	24
1.3.4 瞬发中子和缓发中子	26
1.3.5 中子能谱	28
1.4 反应堆理论:核参数	29
1.4.1 中子循环	29
1.4.2 反应性	35
1.4.3 反应性系数	36
1.4.4 中子毒物	39
1.4.5 氙	39
1.4.6 钐	43
1.4.7 控制棒	45
1.5 反应堆理论:反应堆运行	49
1.5.1 次临界增殖	49

1.5.2	反应堆动力学	53
1.5.3	反应堆运行	56

第二章 压水堆核电站热工水力

2.1	压水堆核电站饱和蒸汽动力循环	64
2.1.1	工质及其状态参数	64
2.1.2	水和水蒸气	69
2.1.3	热力学第一定律	75
2.1.4	典型热力过程	76
2.1.5	热力学第二定律	78
2.1.6	热力循环及其热效率	78
2.2	反应堆稳态工况下的传热分析	83
2.2.1	热传递的三种基本方式	84
2.2.2	传热过程和热交换器	87
2.2.3	沸腾传热和临界热流密度	92
2.2.4	反应堆的热源及其分布	97
2.2.5	反应堆内热量输出过程	101
2.3	反应堆稳态工况下的水力分析	106
2.3.1	单相流体一维流动的基本方程	106
2.3.2	流体运动的两种状态	108
2.3.3	一回路冷却剂流动压降	110
2.3.4	自然循环	114
2.3.5	水锤简介	116
2.3.6	汽蚀简介	118
2.4	反应堆稳态热工设计原理	119
2.4.1	反应堆热工设计准则	119
2.4.2	热管因子和热点因子	121

第三章 KKS 编码和电站实体保卫

3.1	KKS 编码系统概述	125
3.1.1	KKS 编码系统简介	125

3.1.2	KKS 编码的特点	125
3.1.3	KKS 编码的两个基本概念	126
3.2	KKS 编码的格式	126
3.2.1	KKS 编码类型和分类	126
3.2.2	编码的格式	127
3.3	KKS 标志	128
3.3.1	全厂标志	128
3.3.2	工艺相关标志	129
3.3.3	安装点标志	133
3.3.4	位置标志	135
3.3.5	KKS 标志表示方式	139
3.4	TNPS 工程特殊约定	139
3.4.1	独立系统画面标志	140
3.4.2	多系统画面标志	140
3.4.3	电缆标志	140
3.4.4	田湾核电站系统的功能分区	141
3.5	田湾核电站实体保卫	142
3.5.1	厂区功能分区	142
3.5.2	按保卫程度分区	143
3.5.3	按辐射程度分区	143
3.5.4	田湾核电站实物保护措施	144

第四章 核电站水化学

4.1	电站水化学基础知识	146
4.1.1	核电站化学控制的目标、目的及其重要性	146
4.1.2	水化学的基本概念和定义	147
4.1.3	核电站相关化学常识	148
4.1.4	大宗化学试剂	149
4.1.5	材料腐蚀常识	150
4.1.6	水质净化	151
4.2	一回路水化学	153
4.2.1	田湾核电站一回路水化学特点	153
4.2.2	不同工况下一回路冷却剂的水质标准和运行限制	154

4.2.3	一回路及相关净化系统	156
4.2.4	一回路水化学工况偏离的原因及纠正偏离的措施	157
4.2.5	一回路放射性监督	159
4.3	二回路水化学	159
4.3.1	二回路水化学概况	159
4.3.2	不同工况下二回路水质标准和运行限制	159
4.3.3	卧式蒸汽发生器的特点、泄漏监测、排污及排污水的净化	163
4.3.4	二回路及辅助系统的水质净化	165
4.3.5	二回路水化学工况偏离的原因及纠正偏离的措施	165
4.4	化学监督	165
4.4.1	实验室化学监督	165
4.4.2	在线化学监测	168
4.4.3	实验室及在线主要化学监测方法	168
4.5	化学指标的考核	169
	参考文献	170

第一章 核物理和反应堆物理 基础知识

1.1 概 述

1.1.1 核电工程要解决的三大问题

图 1-1-1 表示 $^{235}_{92}\text{U}$ 核裂变,这是一种对于核电站最重要的物理现象。此图是对人们多年来对核裂变现象方方面面探索的一个简明扼要的总结。由图可见,在将物理问题转变为核电工程问题时,在核电站的设计、建造和运行方面有以下三个重大的基本问题必须解决。

(1) 将堆芯中的能量带出来加以利用或安全地加以疏导。

(2) 控制反应性。控制好堆芯内的反应性,就控制了堆芯内产生的裂变中子数。而控制了中子数,也就是控制了产生的裂变能量,从而满足电网的需求。

(3) 包容和控制核裂变所产生的放射性产物,即实现对放射性产物的屏障控制功能。

核电站反应堆的操纵员所从事的工作,总的来说就是在安全的前提下,使电站最大限度地发出电力来。从反应堆物理的角度来看,操纵员应按运行规程的要求控制反应性,控制反应堆的功率和功率分布,使相关参数值在限值以下,从而确保三道屏障的完整性。

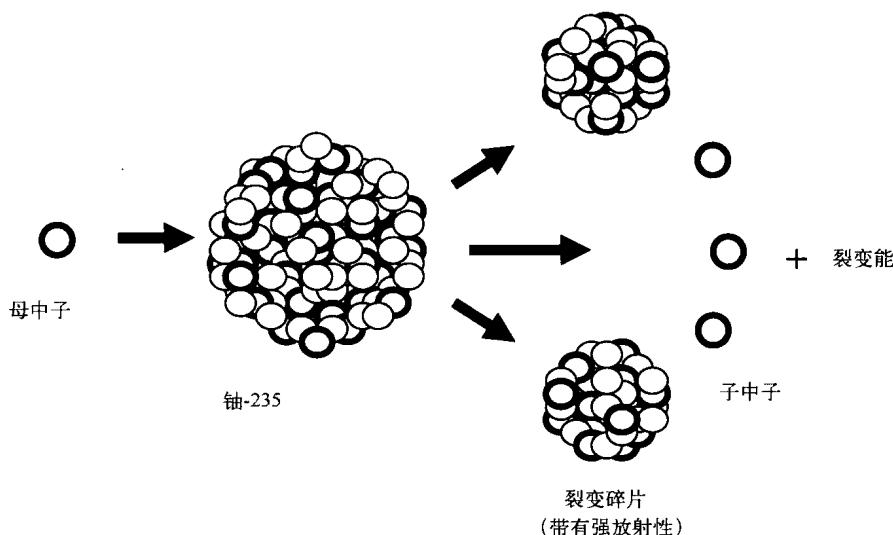


图 1-1-1 铀-235 核裂变现象

- 这是核电站中发生频率最高、最为重要的事件。
- 你能从图中发现建造核电站要解决哪些工程上的基本问题,或者说在核电站的运行中要关注哪些核发电的根本问题吗?

为了实现上述工作目标,在全面学习反应堆物理的基础知识时,对于可由图 1-1-1 中提炼出来的以下物理问题应予以特别关注。

(1) 与 $^{235}_{92}\text{U}$ 核裂变相关的问题。包括 $^{235}_{92}\text{U}$ 的核裂变碎片、中子循环、中子的性能和行为等。这主要是核物理方面的问题,是学习其他知识的基础。

(2) 与反应堆功率有关的概念。反应堆功率涉及反应堆物理和热工,在核物理和反应堆物理方面,包括核反应率、中子注量率、中子注量率分布及其展平、峰值因子、功率和功率分布的控制等。

(3) 与反应性有关的概念。包括点堆动力学方程,缓发中子效应,瞬发临界,周期,倒时方程,反应性控制、反应性因数和反应性效应、裂变产物中毒,反应性平衡等。这些问题与核反应堆运行物理密切相关。

(4) 从反应堆物理的角度看,必须具有以下概念:为了对放射性进行有效的屏障控制,就必须控制好堆芯的反应性以及控制好功率和功率分布,才能确保各道放射性屏障的完整性。

1.1.2 压水堆核电站是怎样工作的

在压水反应堆中,由于轻水的导热性能好,用来作为冷却剂,同时它对中子具有良好的慢化性能,所以它又兼作慢化剂。这种堆芯结构紧凑,功率密度高,平均燃耗深,具有负温度因数,自稳性能好。

堆芯中的冷却剂在吸收了核燃料的原子核裂变产生的能量(热能)后,在冷却剂泵的作用下,流出反应堆压力容器,在由反应堆压力容器、稳压器、蒸汽发生器、冷却剂泵和管道构成的一回路中循环。在流经蒸汽发生器的一次侧时,把热量传给二次侧的给水,使其由水变为蒸汽。蒸汽推动汽轮机的叶片,使汽轮发电机组转动,发出电力。

在汽轮机内做过功的蒸汽(乏蒸汽)在凝汽器中被凝结成水。凝结水经加热、除氧后又被送入蒸汽发生器的二次侧进行又一次循环(复用)。蒸汽发生器的二次侧、蒸汽管道、汽轮机、汽水分离再加热器、凝汽器、凝结水-给水管路、低压加热器和高压加热器、除氧器等构成了二回路。

在凝汽器中的乏蒸汽可以用海水或其他循环水进行冷却。

压水反应堆的基本工作原理如图 1-1-2 所示。

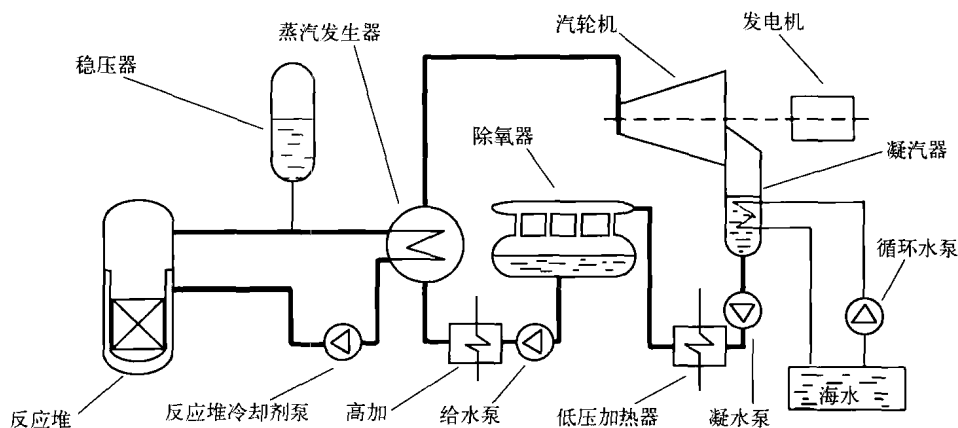


图 1-1-2 典型的压水反应堆工作原理示意图

熟知核电站的工作原理,有助于在学习本课程时,了解和分析在核电站的运行过程中,热量的传输、功率的升降、温度的变化等参数的变化将怎样影响反应堆堆芯内发生的物理过程,以及如何影响核电站的运行。

1.2 原子物理和核物理

1.2.1 物质原子性质

所有的物质都是由原子组成的。原子是保持元素性质的最小的单元。原子本身是由一些更小的粒子组成的,但是,这些较小的粒子就不再具有与元素相同的性质了。

1.2.1.1 物质的结构

(1) 人类对物质结构的认识

古希腊哲学家认为,地球是由基本物质或元素的不同组合构成的。这些基本元素就是泥土、空气、水和火。现代科学证明,古希腊先哲们关于物质是由基本元素组合而成的观点是正确的,但他们所指出的元素却是不正确的。

1661年,英国化学家波意耳宣布了现代元素的准则,他定义一种元素是这样一种基本物质:将它从一种化合物中分离出来后,就再也不能把它分离成更简单的物质,但它能与其他元素相结合而生成化合物。到现在为止,已确认有105种元素存在,其中,有90种是天然存在的,15种是人工制造的。

古希腊先哲们讨论的关于物质的另一个基本概念是:是否可以将物质连续不断地一分再分,成为小而再小的粒子,还是最后会遇到一种不可再分的粒子。约在公元前450年,德莫克拉西提出:物质最终是由小到不可再分的叫做原子的粒子组成的,不同的物质是由不同的原子或不同的原子的结合物组成的,而且,如果使一种物质的原子重新排列,就能变成另一种物质。此后2000多年以来,人们一直不能证明或驳倒这个说法。

英国化学家道尔顿于1803年首次提出了关于物质的原子性质的现代证据。他说,每一种化学元素具有它自己独特的原子,任何数量的元素都是由这种相同类型的原子组成的;一种元素与另一种元素的区别就在于组成它们的原子种类不同;而原子种类之间的基本物理差别就是它们的重量。

自从道尔顿提出原子性质约100年后,人们都认为把原子分成更小的部分是不可能的,而且在这段时间里所有化学实验的结果都表明:原子是不可分的。但是,电和放射性方面的实验终于表明:比原子更小的物质粒子是确实存在的。1906年,汤姆逊因证明了电子的存在而获得了诺贝尔物理奖。电子是带负电荷的粒子,质量为氢原子的 $1/1835$ 。在发现电子后,又很快发现了质子。质子与电子相比,尺寸较大,其质量与氢原子差不多相等,带正电荷,带电量与电子的相等,但符号相反。在1932年,又发现了第3种粒子:中子。中子的质量与质子几乎相等,但呈电中性。

英国物理学家卢瑟福假设,一个原子的正电荷集中在原子中心称为“核”的一个小区域内,而原子所带的电子则在围绕着核的轨道上运动。玻尔将卢瑟福的假设与普朗克提出的量子理论联系在一起,提出:原子由一个密实的、含有质子和中子的核构成,电子在离核不同距离的分立的轨道上运转。在这些轨道中的某一个轨道(或壳层)上的一个电子具有一个特

定的(或分立的)能量(量子),当一个电子从一个允许的轨道上跃迁到另一个允许的轨道上时,就会以所谓光子的单个量子辐射能的形式发射出(或吸收)能量,其值等于这两种状态的能量差。图 1-2-1 是氢原子的玻尔模型。图中表示,当一个电子从第三壳层掉落到第一壳层时会发射出一个光子,其能量等于 $h\nu$ ($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 为普朗克常数; ν 为光子的频率)。

玻尔理论首次成功地解释了实验测量中发现的这种辐射的分立的能级。虽然玻尔理论是专门为解释氢原子而设计的,但此理论对所有原子的结构都是适用的。

(2) 原子的组成

核物理实验证明:原子由一个密实的核,它由质子和中子这两种基本粒子(统称为核子)组成,电子在离核不同距离的分立的轨道上运转。由于原子核所带的正电荷与核外电子所带的负电荷的绝对值相等,因而原子呈电中性。

核的主要特性之一是它的质量。核和其中的核子的质量单位为“原子质量单位”,记作 amu(atom mass unit),定义为中性的 $^{12}_6\text{C}$ 原子质量的 $1/12$ 。

$$\begin{aligned} 1 \text{ amu} &= (12/N_A) \times (1/12) = (6.022\ 142 \times 10^{23})^{-1} \text{ g} \\ &= 1.660\ 538\ 7 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned} \quad (1-2-1)$$

式中, N_A 为阿伏加德罗常数。此式表明,常数 N_A 本质上是宏观质量单位“克”与微观质量单位“amu”的比值。而 N_A 又表示一个摩尔的任何元素都包含有 $6.022\ 142 \times 10^{23}$ 个原子。

质子带一个单位的正电荷,其电量等于电子电荷的电量(这种粒子实际上就是氢原子的核,也就是去掉氢原子唯一的电子后所剩下的部分)。

质子的质量为: $M_p = 1.007\ 277 \text{ amu}$ 。

中子不带电。中子的质量为: $M_n = 1.008\ 665 \text{ amu}$ 。

质子、中子以克为单位的质量分别为: $M_p = 1.672\ 648 \times 10^{-24} \text{ g}$ 和 $M_n = 1.674\ 954 \times 10^{-24} \text{ g}$ 。由此可见,中子略重于质子。

电子的质量为: $M_e = 0.000\ 549 \text{ amu}$ 。所以整个原子的质量几乎就是原子核中质子和中子的质量。

表 1-2-1 列出了原子中的粒子的性质。

按照原子核结构的理论,一个电荷数为 Z (原子序数)、质量接近于氢原子质量 A 倍的原子核是由 Z 个质子和 $N = A - Z$ 个中子组成。整数 A 称为核的质量数。每一类包含一种唯一的质子和中子的结合方式(具有特定 Z 、 A 的原子核)的原子称为核素,用

符号 ^A_ZX 表示。每一种核素可用图 1-2-2 所示的元素化学符号 ^A_ZX 来表示,其中左脚标 Z 表示原子序数,左肩标 A 表示质量数。因为每一元素有唯一的名称、化学符号和原子序数,

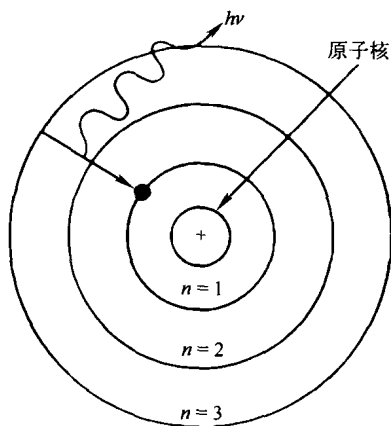


图 1-2-1 氢原子的玻尔模型

表 1-2-1 原子中粒子的性质

粒子	位置	电荷	质量/amu
中子	核内	无	1.008 665
质子	核内	+1	1.007 277
电子	绕核壳层	-1	0.000 548 6

所以要识别该元素,只要三者之一就可以了。为此,核素可以用化学名称、或者在化学符号后面跟以质量数来表示,例如, U-235,或铀-235。另一种常用的表示方式是使用带有左肩标的化学元素的缩写,如 ^{235}U 。在本教材的正文中,通常用在元素名称的后面跟质量数来表示。在方程和表中将常用图 1-2-2 所示的格式。

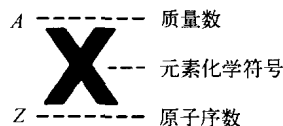


图 1-2-2 表示核素的专门符号

(3) 原子核的大小

与原子半径相似,原子核的大小(半径)并不是一个可精确确定的量。用宏观的尺度来衡量,核半径是一个很小的量,约为 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ cm 数量级,无法直接测量,一般通过原子核与其他粒子的相互作用间接测量得到:测量带电粒子(如高能电子等)与核的库仑相互作用,得到核的电荷分布半径,即核内质子分布半径;测量核子(如中子、质子等)与核的强相互作用,得到核物质的分布半径,即核力作用半径。实验证实:可以把核看作一个不可压缩的密度均匀的球,其半径与原子的质量数有关。

$$r = (1.25 \times 10^{-13} \text{ cm}) A^{1/3} \quad (1-2-2)$$

式中: r ——核半径,cm;

A ——原子质量数(无量纲)。

尽管原子核比原子小得多(原子的平均半径约为 2×10^{-8} cm),但其质量却占整个原子的 99.9% 以上。这种类似于太阳系的具有核心的原子模型(玻尔模型)唯象理论就是据此建立的。

1.2.1.2 同位素

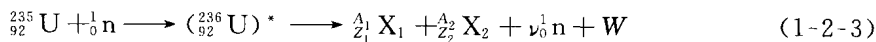
同位素是这样的核素:它们具有相同的原子序数,因而具有相同的元素名称,但是中子数不同。大多数元素有若干种稳定的同位素和一些不稳定的放射性同位素。例如,氧有三种稳定的同位素(氧-16、氧-17、氧-18),可以在自然界中找到它们。氧还有 8 种放射性同位素。另一个例子是氢,它有两种稳定的同位素(氢-1 和氢-2)和一种放射性同位素(氢-3)。

氢的同位素是唯一特殊的,它们之中的每一种都有其专门名称,而不采用常用化学元素名称,总是把氢-1 叫做“氢”;氢-2 通常叫做“氘”(Deuterium),用符号 ^2_1D 表示;氢-3 通常称作“氚”(Tritium),用符号 ^3_1T 表示。通常氘和氚分别用符号 ^2_1H 和 ^3_1H 来表示。

又如: $^{235}_{92}\text{U}$ 表示该铀原子核内有 92 个质子,235 个核子(质子和中子总数)。显然,原子核内有 $235 - 92 = 143$ 个中子。 $^{238}_{92}\text{U}$ 原子核内也有 92 个质子,但共有 238 个核子(质子和中子总数)。因而其原子核内的中子数为 $238 - 92 = 146$ 个。 $^{235}_{92}\text{U}$ 和 $^{238}_{92}\text{U}$ 在元素周期表中的同一个位置上。

在热中子的轰击下 $^{235}_{92}\text{U}$ 原子核能分裂成两个碎片,同时释放出大量的能量,它被称为易裂变物质,可用作核反应堆的燃料。除 $^{235}_{92}\text{U}$ 外,还有 $^{233}_{92}\text{U}$ 、 $^{239}_{94}\text{Pu}$ 和 $^{241}_{94}\text{Pu}$ 等核素在各种能量的中子作用下均能发生裂变,并在低能中子作用下发生裂变的可能性比较大,它们都是可裂变物质。

$^{235}_{92}\text{U}$ 核吸收中子并发生裂变反应的一般表示式为:



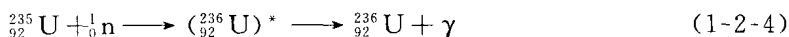


式中: $({}_{92}^{236}\text{U})^*$ ——复合核;

${}_{Z_1}^{A_1}\text{X}_1, {}_{Z_2}^{A_2}\text{X}_2$ ——中等质量数的核素。

它们是质量数分别为 A_1, A_2 的核, 称为裂变碎片。 ν 为每次裂变平均放出的中子数。 W 为裂变释放出的能量, 约为 200 MeV。

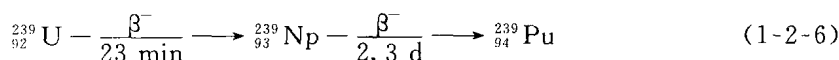
然而, ${}_{92}^{235}\text{U}$ 核吸收中子后并不都发生核裂变, 除产生上述裂变反应外, 还可能产生辐射俘获反应:



核素 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 与 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 不同, 它在热中子的轰击下不能产生裂变反应, 而是在俘获中子后生成复合核 $({}_{92}^{239}\text{U})^*$ (辐射俘获反应), 经过两次 β^- 衰变而转化为 ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ (如上述, 它是一种很重要的易裂变核素)。 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 被称为可裂变核素。核反应式为: ${}_{92}^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma){}_{92}^{239}\text{U}$, 即:



${}_{92}^{239}\text{U}$ 经两次衰变生成 ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, 下面是再生燃料 ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ 的生成反应:



与 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 同为可裂变物质的还有 ${}_{90}^{232}\text{Th}, {}_{94}^{240}\text{Pu}$ 等核素, 它们只有在能量高于某一阈值的粒子作用下才能发生裂变。由上述可见, ${}_{92}^{235}\text{U}$ 和 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 具有不同的核特性, 但是它们的化学性质却极为相似。

1.2.2 质量亏损和结合能

质量守恒和能量守恒这两个互不相干的定律, 在核级水平上就不能严格地适用。质量和能量之间是可以相互转换的。可以用一种单一的守恒定律来代替这两个互不相干的守恒定律, 即, 质量和能量之和是守恒的。质量并不以一种不可思议的方式产生和消失, 质量的减少伴随着能量的增加, 反过来也一样。

1.2.2.1 质量亏损

精密测量表明, 某一特定的原子的质量总是略小于组成该原子的各中子、质子以及电子的质量之和。原子质量与组成它的各部分的质量之和的差值称为质量亏损 (Δm), 可利用式 (1-2-7) 进行计算。在计算过程中, 要注意的是要全部使用精确测量的值, 这是因为这种质量差与原子的质量比较起来要小得多, 如果在计算之前将原子和粒子的质量四舍五入成三位或四位有效数字, 计算得到的质量亏损将等于零。

$$\Delta m = [Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n] - m_{\text{atom}} \quad (1-2-7)$$

式中: Δm ——质量亏损 (amu);

m_p ——质子的质量 (1.007 277 amu);

m_n ——中子的质量 (1.008 665 amu);

m_e ——电子的质量 (0.000 548 597 amu);

m_{atom} ——核素 ${}_{Z}^AX$ 的质量 (amu);

Z ——原子序数 (质子数);

A ——质量数 (核子数)。

1.2.2.2 结合能

在核素形成时, 质量的丧失 (或质量亏损), 是由于质量转变成了结合能。结合能是一种

要使核中的粒子(核子)完全分离开来而必须对核提供的能量。也可以理解为:使分离的粒子形成该原子核时所释放出来的能量。因此,结合能是与质量亏损等效的能量。因为在核形成时,质量的亏损转变成了结合能(BE),可以根据爱因斯坦的“相对论”中的质量—能量关系式导出它们之间的转换因子。

爱因斯坦著名的质量—能量关系式为 $E = mc^2$ (c 为光速, $c = 2.998 \times 10^8$ m/s)。将 1 amu 的质量代入能量守恒方程,并应用一些转换因子,就可确定与该质量等效的能量。

$$E = mc^2 \quad (1-2-8)$$

$$\begin{aligned} &= 1 \text{ amu} \left(\frac{1.6606 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ amu}} \right) \times (2.998 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \times \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \times \left(\frac{1 \text{ J}}{1 \text{ N} \cdot \text{m}} \right) \\ &= 1.4924 \times 10^{-10} \text{ J} \left(\frac{1 \text{ MeV}}{1.6022 \times 10^{-13} \text{ J}} \right) \\ &= 931.5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

式中: $1 \text{ amu} = 1.6606 \times 10^{-27} \text{ kg}$;

$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$;

$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$;

$1 \text{ MeV} = 1.6022 \times 10^{-13} \text{ J}$ 。

因为 1 amu 相当于 931.5 MeV 能量,故结合能可用下式进行计算:

$$BE = \Delta m \times \left(\frac{931.5 \text{ MeV}}{1 \text{ amu}} \right) \quad (1-2-9)$$

若把原子核拆成自由核子平均对每个核子所做的功称为比结合能,这也就是原子核中每个核子的平均结合能,用 ϵ 表示:

$$\epsilon = \Delta E / A \quad (1-2-10)$$

ϵ 的单位是兆电子伏 / 核子 (MeV/Nu)。通过对各种核的比结合能的系统研究,得到了图 1-2-3 所示的比结合能曲线图(ϵ — A 图),它有如下特点。

(1) 结合能与质量数之比大致为常量,即 $\Delta E \propto A$ 。这表明原子核的结合能粗略地与核

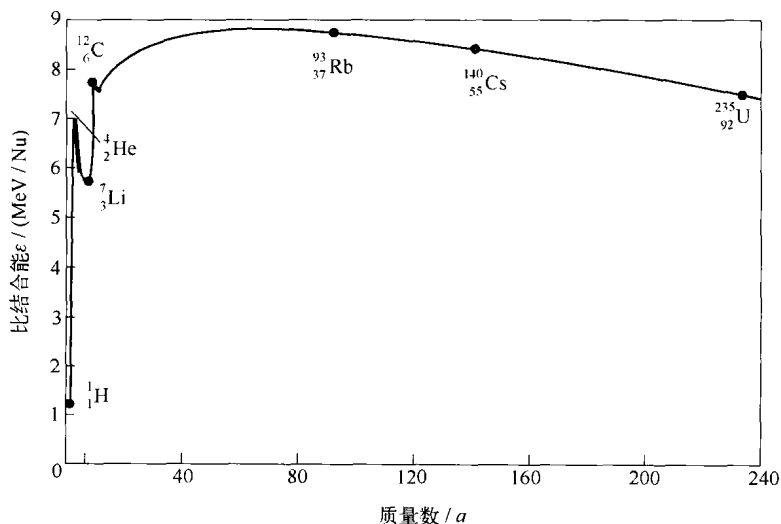


图 1-2-3 比结合能曲线