

核反应堆热工学

〔美〕 M.M.埃尔-韦基尔著

原子能出版社

内 容 简 介

本书原是作者为美国大学毕业班学生写的一本关于核反应堆热工学的基础教材。书中除了简单介绍反应堆物理的一些基本概念以外,主要讲述核反应堆活性区内的燃料元件、各类部件以及活性区整体的释热方式和传热过程。它阐述了各类反应堆部件内的热传导问题。对反应堆内常用的各种冷却剂的对流传热问题,包括单相和两相,也都作了阐述。最后对于反应堆热工计算中特有的热点因子和活性区热工设计步骤作了概略性的介绍。

本书可作为大专院校反应堆工程专业学生的参考书。对从事反应堆热工工作的技术人员,也有一定参考价值。

NUCLEAR HEAT TRANSPORT

M. M. El-Wakil

International Textbook Company, 1971.

核 反 应 堆 热 工 学

M. M. 埃尔-韦基尔著

陈叔平、马驰、李世坤译

原子能出版社出版

外文印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $177^{1/16}$ ·字数 464 千字

1976 年 11 月北京第一版 1978 年 11 月北京第二次印刷

印数 2801—6300 ·定价: 2.10 元

统一书号: 15175·055

作 者 序

本书讲述核裂变反应堆活性区的能量释放过程和能量输运过程,从活性区本身讲起,一直讲到活性区的热工设计为止。

这份教材由作者几年来给毕业班学生和研究生混合班授课的讲义整理而成。作者在以前写的一本书^[1]中,曾把与核动力工程有关的物理、热力学、传热以及流体流动等学科的各自特点及其相互关系综合起来作了介绍。然而,对于核反应过程中的能量(热)释放过程、反应堆冷却剂把能量输运给动力循环的过程、输运机理对反应堆活性区设计者所施加的限制等,有进一步全面论述的必要。本书就是为此目的而写的。

因为现在适合工程技术人员阅读的核物理和反应堆物理方面的教科书比过去多了,所以作者把本书的物理部分压缩在前三章。为了理解后面的内容,这一部分已经够用。这三章可以作为复习材料,也可以省略不读。

前三章的主要目的,是叙述反应堆活性区内中子与物质相互作用的方式以及中子本身在整个活性区内的分布方式。把这些知识作为必要的前提,本书的余下各章循序渐进地阐述有关课题,直到活性区的热工设计为止。

在第四章中把活性区看作一个整体,讲述其内部由中子与物质相互作用引起的释热。第五章到第八章探讨反应堆活性区各种燃料元件和各种形状的其他反应堆部件内的传热和温度分布。稳态和不稳态、一维和二维、其它特殊情况以及它们的各种解法(解析法、数值法和类比法)都要讲到。

接着讲述流体(反应堆冷却剂)的排热机理。单相流动的非金属冷却剂和金属冷却剂分别在第九章和第十章中论述。在第十一章中讲述重要的相变机理,并且讲述它对不沸腾堆和沸腾堆两者的燃料的热通量所施加的限制。在第十二章中论述了两相流现象、它对反应堆流体动力学的影响以及它在失水事故中所起的作用。

第十三章探讨活性区的热工设计。先从名义温度分布谈起,然后对在与设计规范有预期偏离情况下的最高运行温度进行统计计算,而后简单介绍了活性区热工设计的步骤。第十四章讲述沸腾活性区的流体动力学和设计步骤。

与此同时,作者接受了与本书类似的一本书^[2]的写作任务。该书论述的题目是核能转换。它包括的内容有:从工程角度论述各类核动力装置,如裂变动力装置(沸水堆、压水堆、气冷堆、快增殖堆等)、同位素动力装置(能量直接转换)以及聚变动力装置等。在这些核动力装置内,利用各类核反应生产所需的能量,从而使得这些装置具有各自的特性。

本书的对象是工程、物理或化学专业的毕业班学生或研究生以及从事实际工作的工程技术人员。本书可以在一个学期内用每周三到四小时的时间学完。因为核动力工程领域发展十分迅速,所以鼓励学生收集期刊上发表的最新资讯,特别是那些对设计有用的公式,作为阅读本教材的补充。

M. M. 埃尔-韦基尔

麦迪逊, 威斯康星

目 录

第一章 原子、原子核的结构和反应·····	1
§ 1-1 引言·····	1
§ 1-2 原子结构·····	2
§ 1-3 重原子的结构·····	5
§ 1-4 化学反应·····	7
§ 1-5 核反应方程·····	9
§ 1-6 核反应产生的能量·····	11
§ 1-7 核聚变和核裂变·····	12
§ 1-8 转换和增殖·····	15
§ 1-9 裂变和燃料的燃耗产生的能量·····	16
§ 1-10 放射性·····	18
§ 1-11 衰变率和半衰期·····	23
§ 1-12 放射性链·····	28
习题·····	30
第二章 中子及其与物质的相互作用·····	34
§ 2-1 引言·····	34
§ 2-2 中子的能量·····	34
§ 2-3 裂变中子·····	36
§ 2-4 热中子·····	37
§ 2-5 核截面·····	41
§ 2-6 中子通量和核反应率·····	44
§ 2-7 中子截面随中子能量的变化·····	45
§ 2-8 $1/V$ 区·····	48
§ 2-9 共振区·····	48
§ 2-10 快中子区·····	50
习题·····	51
第三章 活性区内中子通量的分布·····	54
§ 3-1 引言·····	54
§ 3-2 中子守恒·····	54

§ 3-3	中子在介质内的扩散	57
§ 3-4	反应堆活性区内的中子通量分布	60
§ 3-5	反射层及其效应	64
§ 3-6	不稳态和反应性	67
§ 3-7	反应性的温度系数	70
§ 3-8	反应性的多普勒系数	71
§ 3-9	反应性的空洞系数和压力系数	72
习题		74

第四章 反应堆释热77

§ 4-1	引言	77
§ 4-2	燃料内的释热率	77
§ 4-3	反应堆内的裂变能	78
§ 4-4	可裂变燃料的密度	80
§ 4-5	反应堆内的裂变截面	84
§ 4-6	单根燃料元件释出的热量	92
§ 4-7	活性区内释出的总热量——概述	94
§ 4-8	均匀活性区的情况	95
§ 4-9	具有大量燃料元件的非均匀反应堆的情况	96
§ 4-10	反应堆停堆后的释热	99
§ 4-11	放射性同位素的释热	104
习题		106

第五章 反应堆部件内的热传导之一——一般情况

和一维稳态情况109

§ 5-1	引言	109
§ 5-2	一般性的假设	109
§ 5-3	热传导方程	112
§ 5-4	从固体平板型燃料元件导出的热流	118
§ 5-5	温度、传热系数和热通量(或中子通量)的相互关系	124
§ 5-6	从实心圆柱形燃料元件导出的热流	128
§ 5-7	从空心厚壁圆柱形燃料元件导出的热流	132
§ 5-8	从球形燃料导出的热流	134
习题		135

第六章 反应堆部件内的热传导之二——某些特殊的一维

稳态情况	138
§ 6-1 引言	138
§ 6-2 活性区辐射的吸收	138
§ 6-3 遭受辐射的平板内的排热	142
§ 6-4 热屏蔽	150
§ 6-5 次级辐射	152
§ 6-6 反应堆内的肋片	153
§ 6-7 低毕奥数肋片的传热	156
§ 6-8 等横截面肋片的情况	158
§ 6-9 最佳肋片和三角形肋片	162
§ 6-10 等厚度周向肋片的情况	164
§ 6-11 多孔元件内的传热	165
§ 6-12 $q''' = f(t)$ 的泊松方程的特殊情况	173
§ 6-13 材料物性与温度和压力的关系	175
习题	176

第七章 反应堆部件内的热传导之三——二维稳态情况

§ 7-1 引言	181
§ 7-2 有限差分法——概述	181
§ 7-3 泊松方程的变换	184
§ 7-4 各种求解的方法	187
§ 7-5 矩阵代数法求解	189
§ 7-6 迭代法求解	191
§ 7-7 张弛法求解	193
§ 7-8 有限差分系统内的热传导	198
§ 7-9 弯曲边界附近的节点	199
§ 7-10 绝热边界上的节点	202
§ 7-11 表面热导为 h 的边界上的节点	203
§ 7-12 具有确定热通量的边界上的节点	204
§ 7-13 近似解析法	204
§ 7-14 类比方法	207
习题	210

第八章 反应堆部件内的热传导之四——不稳态·····213

§ 8-1 引言·····	213
§ 8-2 集总参量法·····	213
§ 8-3 时间常数和温度系数的效应·····	215
§ 8-4 用有限差分计算温度瞬变过程·····	216
§ 8-5 二维瞬变情况的数值解·····	221
§ 8-6 平板和没有附面层的图解法·····	223
§ 8-7 具有附面层的图解法·····	227
§ 8-8 多层平壁的情况·····	230
§ 8-9 圆柱体的图解法·····	231
§ 8-10 严格解析法·····	234
习题·····	242

第九章 传热和流体流动——非金属冷却剂(单相)·····245

§ 9-1 引言·····	245
§ 9-2 排热量和唧送功率·····	246
§ 9-3 传热系数——概述·····	250
§ 9-4 普朗特数对对流传热的影响·····	253
§ 9-5 非金属冷却剂的对流传热系数·····	257
§ 9-6 冷却剂孔道的长度和形状的影响·····	264
§ 9-7 热通量和温度沿轴向不均匀分布的影响·····	266
§ 9-8 高的气体速度的影响·····	268
习题·····	272

第十章 传热和流体流动——液态金属冷却剂·····274

§ 10-1 引言·····	274
§ 10-2 一些一般性的考虑·····	274
§ 10-3 液态金属冷却剂内的感生放射性·····	276
§ 10-4 液态金属与材料的相容性·····	278
§ 10-5 液态金属的热输运性质·····	281
§ 10-6 液态金属的传热关系式·····	283
§ 10-7 轴向热扩散的影响·····	286
§ 10-8 液态金属流态燃料的一些传热关系式·····	288
§ 10-9 流态燃料系统内的传热机理·····	289

§ 10-10 液态金属泵	295
§ 10-11 直流泵	296
§ 10-12 直流泵设计和运行中的一些问题	301
§ 10-13 交流泵	304
习题	306
第十一章 相变时的传热	308
§ 11-1 引言	308
§ 11-2 相变的过程	308
§ 11-3 汽泡的生成、长大和跃离	310
§ 11-4 沸腾工况	316
§ 11-5 沸腾危机和烧毁	320
§ 11-6 各个参量对沸腾和沸腾危机的影响	322
§ 11-7 水的临界热通量关系式	326
§ 11-8 其它液体(水除外)的临界热通量关系式	331
§ 11-9 冷凝	334
习题	341
第十二章 两相流	344
§ 12-1 引言	344
§ 12-2 不流动系统中的含汽量和空洞率	345
§ 12-3 流动系统	347
§ 12-4 沸腾段高度和不沸腾段高度	354
§ 12-5 两相孔道内的摩擦压降	355
§ 12-6 加速度压降	364
§ 12-7 在阻力件处的两相流压降	366
§ 12-8 突然扩口引起的压升	367
§ 12-9 突然缩口引起的压降	370
§ 12-10 孔板内的两相流	372
§ 12-11 临界流	374
§ 12-12 单相临界流	376
§ 12-13 两相临界流	379
§ 12-14 长孔道内的两相临界流	380
§ 12-15 短孔道内的两相临界流	384
习题	386

第十三章 活性区的热工设计	390
§ 13-1 引言	390
§ 13-2 一般性的考虑	390
§ 13-3 燃料元件和冷却剂的轴向温度分布	394
§ 13-4 燃料元件内的最高温度	398
§ 13-5 冷却剂孔道的孔板节流	403
§ 13-6 热点因子	405
§ 13-7 基本的统计关系式	408
§ 13-8 确定热点支因子的一个例子	413
§ 13-9 总热点因子	416
§ 13-10 活性区的热工设计	420
习题	424
第十四章 沸腾活性区	429
§ 14-1 引言	429
§ 14-2 沸腾反应堆内的流动	429
§ 14-3 沸腾反应堆的质量平衡和热平衡	430
§ 14-4 沸腾孔道内的驱动压力	433
§ 14-5 沸腾孔道内的平均密度	436
§ 14-6 吸力筒的作用	441
§ 14-7 多孔道的沸腾活性区	443
习题	448
附录A 元素表	452
附录B 同位素简表	455
附录C 贝塞尔函数	479
附录D 一些物质的热力学性质	485
附录E 一些物质的物性	497
附录F 穆迪摩擦系数曲线图	501
附录G 物理常数	503
附录H 单位换算表	506
参考文献	513
索引	523

第 一 章

原子、原子核的结构和反应

§ 1-1 引 言

在研究核反应堆内的能量释放过程之前，有必要复习一下原子结构和核结构以及引起此种能量释放的各种反应。这些反应包括裂变、聚变、各种类型的中子与核之间的相互作用以及放射性^[1-5]。

1803年，约翰·道耳顿在试图解释化合的规律时，提出了他的简单而不完整的原子假说。其中他假设所有元素都由不可再分割的物质微粒即原子¹⁾所组成。不同元素的原子也是不同的，在化学反应中这些原子保持它们的本性。1811年阿马杜·阿伏伽德罗提出了以分子为基础的分子论，分子是由有限个数的原子组成的物质粒子。

现在已经知道，原子本身也是由一些次粒子组成的。这些次粒子是所有元素的原子中都有的。原子由核和一些电子组成。核比较重，具有正电荷；电子则轻得多，具有负电荷，它们位于围绕核的各个轨道上。核本身又由称为核子的次粒子所组成。粒子主要有两种：不带电的中子和带正电荷的质子。质子的电荷与电子的电荷量值相等而符号相反。原子作为一个整体是不带电的，因而其中的质子数等于轨道上的电子数。

一种元素的原子丧失或获得某些上述的次粒子时，就可以转变为另一种元素的原子。这些反应引起质量变化 Δm ，并因此按照

¹⁾ 更早以前，在公元前五世纪，希腊人德谟克利特(Democritus)就曾经断言：最简单的东西是原子，一切东西都是用它做成的。(希腊语原子意指不可分割。)

下面的爱因斯坦定律放出(或吸收)大量能量 ΔE :

$$\Delta E = \frac{1}{g_c} \Delta m c^2 \quad (1-1)$$

式中 c 是在真空中的光速, g_c 是换算因数(§1-6)。方程(1-1)适用于放出能量或吸收能量的所有反应。然而,能量如果与原子核内的变化有关,就把它归为核能类。

§1-2 原子结构

图1-1是三种原子的示意图。第一个是氢,它有一个核和一个轨道电子,核由单个质子组成,没有中子(氢是唯一不含中子的原子)。第二个是氘,在它的核中有一个质子和一个中子,在轨道上还有一个电子。第三个是氦,它含有两个质子、两个中子和两个电子。这些电子处在轨道上,其电量为单位负电荷。可以把电子作为集中电荷(如图所示)来进行量子化处理。

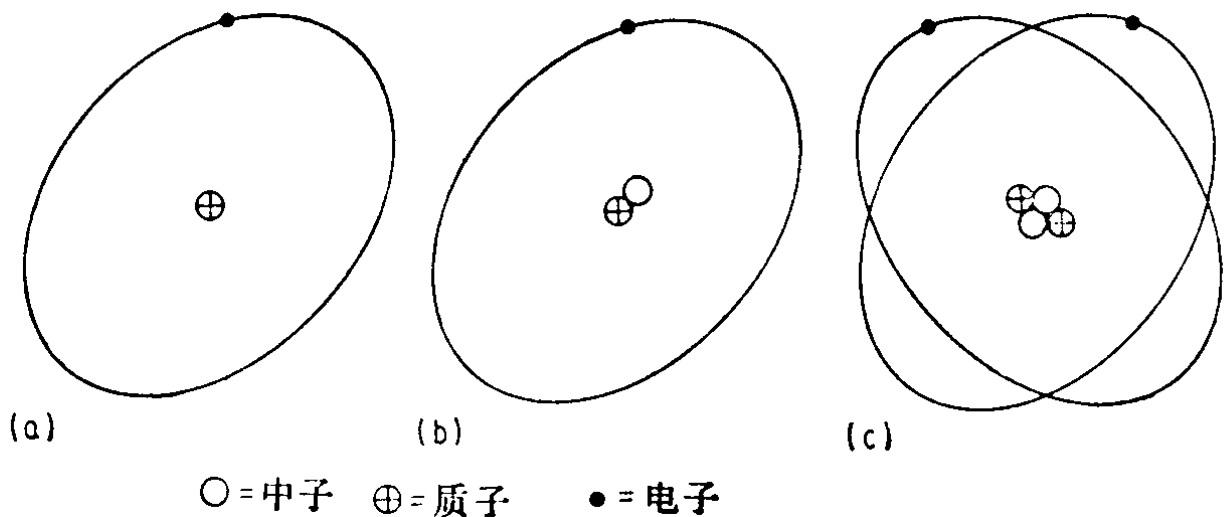


图1-1 几个轻原子的略图。(a)氢;
(b)氘,即重氢;(c)氦

原子质量的绝大部分都集中在核上。原子的上述三种主要次粒子的质量为:

中子质量 $m_n = 1.008665$ 原子质量单位

质子质量 $m_p = 1.007277$ 原子质量单位

电子质量 $m_e = 0.0005486$ 原子质量单位

1 原子质量单位大约等于 1.66×10^{-24} 克*, 或 3.66×10^{-27} 磅。(见附录 H 单位换算表。)

中子、质子和电子是所有原子的三种主要组成部分。各种原子的质量之所以不同, 就是因为它们所包含的这些粒子的数目变化的结果。质子数相等的原子和核具有相似的化学性质和物理性质, 差别主要是在它们的质量上。它们称为同位素。例如, 氘就是氢的一个同位素, 常常称它为重氢。普通氢即天然存在的氢中含有 $1/6400$ 的氘。当与氧化合时, 普通氢和氘分别形成普通水(或简称水)和重水。

核内质子的数目称为原子序数 Z 。核内的核子总数称为质量数 A 。因为中子或质子的质量都近似等于 1 原子质量单位, 所以 A 是最接近核质量的整数, 而核质量又近似等于原子的质量。因此同一种元素的同位素具有相同的原子序数, 但质量数不同。核的符号习惯上写成

$${}_Z\text{X}^A$$

其中 X 是平常的化学元素符号。于是氢核就是 ${}_1\text{H}^1$, 而氘就是 ${}_1\text{H}^2$ (有时写成 D), 普通氦是 ${}_2\text{He}^4$ 。对于不包含质子的粒子, 下标表示电荷的量值(以质子电荷作单位)和符号。于是电子就是 ${}_{-1}\text{e}^0$, 中子就是 ${}_0\text{n}^1$ 。核的符号也常常写成 He-4 、氦 4 等形式。在另一个标记系统中把核的符号写成 ${}_Z^A\text{X}$, 但在本书中不用这个系统。

存在于自然界中的许多元素(如上述的氢), 往往都是丰度不同的几种同位素的混合物。例如, 天然存在的铀(称为天然铀)由质量占 99.282% 的 U^{238} , 0.712% 的 U^{235} 和 0.006% 的 U^{234} 所组成。因为它们的原子序数都是 92, 所以这里就不再标出了。有许多同位素在自然界是没有的, 它们是在实验室中或在核反应堆内生成的。例如, 已知铀总共有 14 种同位素, 其质量数从 227 变到

* 本书中质量的单位用克、磅等表示, 力的单位用克力、磅力等表示。——译者注

240。

在附录 A 中按化学符号的字母顺序列出了已知的各种元素、它们的化学符号和原子序数。附录 B 按照原子序数的次序列出了同一些元素以及它们的一些性质。附录 B 中第四栏给出了在自然界出现的各种元素的原子量；它们的顺序与原子序数的顺序是相同的，极少例外。接下去的三栏列出了已知同位素的质量数、同位素的质量(以原子质量单位计)以及在自然界出现的同位素的丰度(以原子百分数计)。最后三栏列出了另外一些性质，这些性质将在后面再讲。

在核释热中还有另外两种粒子也很重要，它们是正电子和中微子。正电子是带正电荷的电子，即其电荷和质量都与电子相同但电荷符号相反的 β 粒子。它的符号为 ${}_{+1}e^0$ ， e^+ 或 β^+ 。中微子(微小的中子)是非常小的不带电粒子。由于它非常小，又呈中性，所以很难用实验观测到。最初证明它的存在是根据理论上的考虑。在发射或俘获 β 粒子(正电子或负电子)的核反应中，反应产生的能量(按损失的质量计算)与发射出的 β 粒子的能量和反冲核的能量之和总是不相等。这违反了能量守恒定律。因此，在 1934 年沃尔夫冈·泡利(Wolfgang Pauli)第一个提出了中微子，认为在这类反应中同时还放射出中微子，由它们实现了能量平衡。中微子携带的能量常常比 β 粒子本身携带的能量还大。中微子的重要性可以根据下列事实来判断：在裂变反应堆产生的全部能量中，大约有 5% 是被中微子带走的。这部分能量对我们来说是完全丧失掉了，因为中微子与任何实际的结构材料都不起反应，也不会被它们阻止住。中微子常用的符号是 ν 。

其它的原子次粒子还有很多。一个例子就是介子，它是带正电、带负电或者中性的不稳定粒子，其质量处在电子和质子的中间。它在核子与核子之间交换，进而想到用它来解释核子与核子之间的作用力。然而，对这些粒子和其它一些粒子的讨论已经超出了本书的范围。

§ 1-3 重原子的结构

电子数目较多(Z 大)的原子即使处于基态时,即未受激(没有激发能)时,它的所有电子也并不处在一个轨道上,而是分布在不同的壳层上。壳层用量子数 $1, 2, 3, 4, \dots$ 等表示,习惯上分别给以名称 K, L, M, N, O, $\dots$ 。当原子处于基态时,在任何一个壳层上作轨道运动的电子数目不能超过 $2n^2$ 。表 1-1 中给出了任一壳层可以存在的最大电子数。

表 1-1 各个壳层的最大电子数

量 子 数 n	壳 层 名 称	最 大 电 子 数
1	K	2
2	L	8
3	M	18
4	N	32
5	O	50

一般来说(但也有例外),较低的壳层尽先填满(图 1-2)。例如,锂($Z=3$)共有 3 个电子,其中 2 个电子填满 K 壳层,只有 1 个处在 L 壳层上;氖($Z=10$)有 K 和 L 两个壳层,分别被 2 个和 8 个电子所填满;磷($Z=15$)在 K 壳层有 2 个电子, L 壳层有 8 个,剩下的 5 个就填充 M 壳层的一部分,如此等等。

在原子最外面的壳层作轨道运动的电子称为价电子,而最外面的壳层称为价壳层。于是氢就有一个价电子,而它的 K 壳层就是价壳层,等等。元素的化学性质就是由价电子数目决定的。

气体 ${}_2\text{He}$, ${}_{10}\text{Ne}$, ${}_{18}\text{Ar}$, ${}_{36}\text{Kr}$, ${}_{54}\text{Xe}$ 和 ${}_{86}\text{Rn}$ 是所谓贵气体,即惰性气体。它们都是单原子气体。它们几乎不与其它元素化合,甚至也不与它们自己结合形成多原子的分子。 He 有 2 个价电子(填满 K 壳层), Ne 有 8 个(填满 L 壳层),其余元素也都有 8 个价电子,分别填在 M, N, O 和 P 壳层。这些气体的价电子数目都刚好填满这些壳层。它们之所以是惰性的,就是因为它们的价壳层已

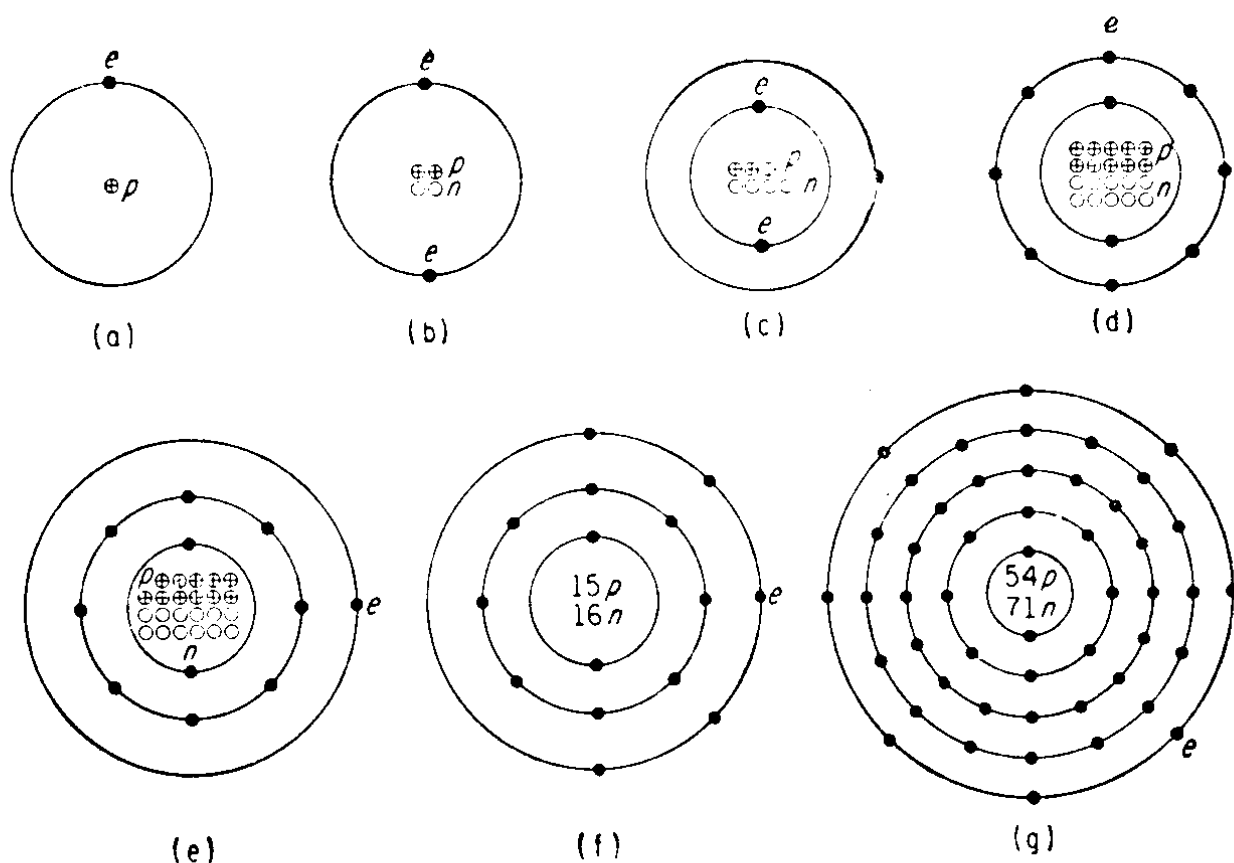


图 1-2 一些原子的结构(轨道半径不按比例)

(a) 氢 ($Z=1$, $A=1$); (b) 氦 ($Z=2$, $A=4$); (c) 锂 ($Z=3$, $A=7$);
 (d) 氖 ($Z=10$, $A=20$); (e) 钠 ($Z=11$, $A=23$); (f) 磷 ($Z=15$,
 $A=31$); (g) 铯 ($Z=54$, $A=125$)

经填满了, 不需要交出电子或取得电子。

另一方面, 在元素周期表中这些气体前后的那些元素的化学性质都很活泼。这些气体后面的一组元素, 包括锂、钠、铜等等, 都只有 1 个价电子。它们大部分是金属, 是很好的导电体, 很容易形成正的电离子。也就是说, 它们很容易丧失它们的那 1 个价电子。另一方面, 在惰性气体前面的那组元素都不是好的导电体, 但是很容易获得 1 个轨道电子而形成负的电离子。其它各组元素的活泼程度各有不同。当上述两组的两个元素碰在一起时, 一个元素把其单独的价电子交给另一个元素, 形成两个电荷相反离子, 它们互相吸引而组成一个分子。这就是所谓离子键。NaCl 分子就是一例。其中钠把其单独的价电子给了氯, 钠变成了在 L 壳层有 8 个电子的正离子, 而氯变成了在 M 壳层有 8 个电子的负离子。因而这两个离子有量值相等而符号相反的电荷, 静电吸引

把它们紧紧地结合成 NaCl 分子,有时写成 Na^+Cl^- 。

另外一种电子交换过程是共价键。组成氢分子 H_2 就是一例。在氢分子中,两个氢原子合起来共享两个可用的价电子。这两个价电子完全填满两个原子的 K 壳层,不过每个原子只占用它们的一部分时间。共价键的另外一些例子是 Cl_2 分子、有机化合物以及大多数气体和液体。

还有另外几种键。其中最重要的一种是金属键,它发生在 Na, Fe 和 Cu 的情况下。在这种情况下,外壳层电子能够自由迁移,因而形成一个均匀的电子的海,它们在该元素的正离子的晶格附近自由地运动。这类键的特点是具有高的电导率和热导率。

这里应该提到,在有些固体材料中,键的确切类型还不知道。只有在相当少的情况下,如像 NaCl 的情况,我们才确知存在着的键是哪一种。往往存在着两种键之间的逐步过渡态。例如,在铀燃料中,金属铀具有金属键,二氧化铀(UO_2)则共价键和离子键都有,而碳化铀(UC)则是共价键和金属键。

在原子能工作中,知道材料具有的键的类型是重要的,因为它决定了材料抗核辐照变化的能力。有机堆冷却剂的分子结构的变化就是一个例子^[2]。

§ 1-4 化学反应

化学反应包括整个原子的化合和分解。例如,一个整个的碳原子与两个整个的氧原子(即一个氧分子)化合,形成一个新的二氧化碳的分子:



这个反应同时释放大约 4 电子伏(ev)的能量。

电子伏是在核工程中普遍采用的能量单位。1 电子伏 = 1.519×10^{-22} 英热单位 = 4.44×10^{-26} 瓩·小时 = 1.6021×10^{-19} 瓦·秒(焦耳)(附录 H)。1 兆电子伏(1Mev) = 10^6 电子伏。

在化学反应中,每个原子都作为一个整体参与反应,并在反应