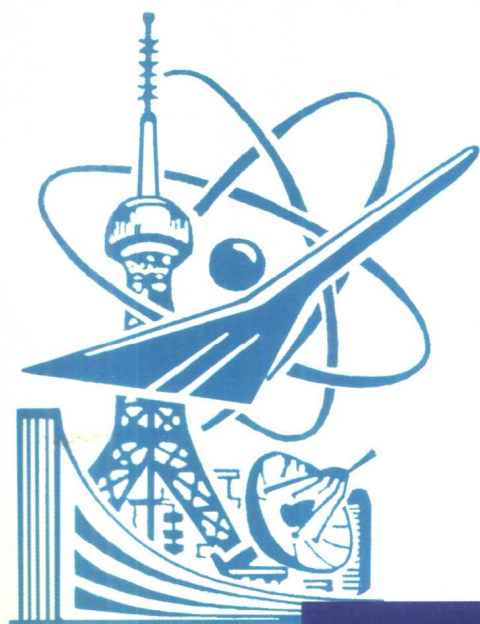


刘德镇 主编



现代射线 检测技术

15.28

中国标准出版社

现代射线检测技术

刘德镇 主编

中国标准出版社

内容提要

本书系统介绍了射线检测的基本原理、成像质量、工程应用技术及现代射线检测的技术进展。内容包括射线检测的物理基础、射线检测原理与成像质量、射线透照技术、暗室处理技术、底片评定及标准介绍、射线检测的技术进展、辐射防护。

本书适用于高等理工院校的材料科学与工程、机械工程及自动化、热能工程、化工设备与机械、检测技术与应用、应用物理、无损检测、质检与商检、锅炉与压力容器检验、电力金属监督、工业检测、安全工程、船舶工程等有关专业与学科开设必修课或选修课的教材。本书也适用于作为射线检测人员技术资格鉴定考核的培训教材或参考书。本书也可供无损检测工程技术人员、管理人员、安全监察人员及有关科技工作者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代射线检测技术/刘德镇主编. -北京: 中国标准出版社, 1999. 6
ISBN 7-5066-1889-3
I. 现… II. 刘… III. 射线检验 IV. TG115. 28
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 14343 号

中国标准出版社出版
北京复兴门外三里河北街 16 号

邮政编码: 100045

电 话: 68522112

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

版权专有 不得翻印

*

开本 787×1092 1/16 印张 19 插页 2 字数 465 千字
1999 年 8 月第一版 2000 年 2 月第二次印刷

*

印数 1 201—2 000 定价 35.00 元

前 言

无损检测是一门新兴的应用科学技术。它以物理学、力学、电子学、计算机与材料科学为基础,在不破坏材料的前提下,应用近代物理学、电子学和计算机科学提供的各种信息检测与信息处理技术,及时准确地发现工程材料及其构件内部及表面的各种缺陷;测定材料的各种性能与物理量,并给予评价。为保证工程材料及其构件制造的高质量、高性能并在安全可靠的基础上经济地、有效地使用提供依据。它是实现质量控制、节约材料、改进工艺和提高劳动生产率的重要手段,也是设备安全运行的重要监察方法。目前在工业生产中已成熟应用的常规无损检测方法包括五大类,它们分别是:射线检测(RT)、超声检测(UT)、磁粉检测(MT)、渗透检测(PT)与涡流检测(ET)。射线检测是常规无损检测的重要方法之一。射线检测具有图像直观、准确可靠、对细小的气孔和夹渣等体积型缺陷具有较高的检测灵敏度、射线底片可以作为缺陷记录与产品质量的档案进行保存等一系列优点。因而射线检测已被广泛应用于材料工程、机械制造、金属结构、造船、锅炉压力容器制造与检验、冶金、电力、石油、化工、航空、航天、核电与国防等工业部门,成为保证工程材料与产品的制造质量,尤其是保证焊接质量,确保设备安全运行的重要技术,在工业生产和国民经济中发挥了重要作用。

为促进无损检测高等教育的发展,中国机械工程学会无损检测学会组织有关高等院校在华东理工大学召开了无损检测大专教材编写讨论会,本书就是根据会议的计划安排及目前高等教育改革的需要,并参照目前我国现行的无损检测人员技术资格鉴定考核的有关法规、标准的要求编写的。在内容的选取和编写上既注重了基本理论的系统性,又加强了工程检测技术的应用,并力图全面反映射线检测近年来的技术进展。全书共分八章,内容包括:射线检测的物理基础、射线检测设备与感光材料、射线检测原理与成像质量、射线透照技术、暗室处理技术、底片评定及标准介绍、射线检测的技术进展,辐射防护。

本书适用于高等理工院校的材料科学与工程,机械工程及自动化、热能工程、化工设备与机械、检测技术与应用、无损检测、质检与商检、锅炉与压力容器检验、电力金属监督、工业检测、安全工程、船舶工程等专业及学科开设必修课或选修课的教材。本书也适用于作为射线检测人员技术资格鉴定考核的培训教材或参考书。同时本书也是从事射线检测的工程技术人员、管理人员、安全监察人员及有关科技工作者有价值的参考资料。

本书编写过程中,参考了目前国内外有关射线检测比较优秀的书刊、论文,在此谨向有关作者表示谢意。

限于水平,书中错误及疏漏之处难免,祈盼广大读者批评指正。

编 者

现代射线检测技术

主 编： 刘德镇

副主编： 马惠民

编委：(以姓氏笔划为序)

马恒升	王吉永	邢兆辉	孙达江
刘燕魁	汪立新	肖世荣	陈 刚
胡永嘉	侯少华	徐 明	黄庆达
张忠奎	张学利	景士海	雒利勇

目 录

第一章 射线检测的物理基础	1
第一节 物质结构、原子辐射与元素周期律	1
第二节 X射线的发生与X射线谱	8
第三节 物质的放射性与 γ 射线的产生	16
第四节 射线的本质与基本性质	19
第五节 射线与物质的相互作用	22
第六节 射线衰减规律	29
第二章 射线检测设备与感光材料	38
第一节 X射线机	38
第二节 γ 射线机	78
第三节 加速器	83
第四节 射线检测胶片	87
第五节 增感屏	94
第三章 射线检测原理与成像质量	98
第一节 射线检测的基本原理与方法	98
第二节 射线照相的对比度	102
第三节 射线照相的不清晰度	107
第四节 射线照相的颗粒度	111
第五节 射线照相的黑度	112
第六节 射线照相的灵敏度	117
第四章 射线透照技术	122
第一节 工艺准备及透照布置	122
第二节 透照工艺参数的确定	125
第三节 曝光曲线	131
第四节 散射线控制	138
第五节 平板对接焊缝透照技术	143

第六节	环焊缝透照技术	147
第七节	小径管对接焊缝透照技术	155
第八节	变截面焊接接头透照技术	160
第九节	球罐 γ 射线全景曝光技术	161
第五章	暗室处理技术	166
第一节	暗室工作基础	166
第二节	暗室处理技术	168
第六章	底片评定及标准介绍	177
第一节	评片基本要求	177
第二节	缺陷识别与特征	182
第三节	质量评定及有关国内标准	191
第四节	国外主要标准介绍	207
第七章	射线检测的技术进展	226
第一节	射线检测实时成像技术	226
第二节	层析摄影与工业CT技术	240
第三节	高能射线检测技术	251
第四节	中子射线照相技术	255
第五节	常规射线照相的特殊方法	261
第八章	辐射防护	268
第一节	常用辐射物理量及其单位	268
第二节	辐射损伤与防护标准	276
第三节	辐射防护方法与计算	281
第四节	辐射防护监测	293
参考文献		296

第一章 射线检测的物理基础

射线检测是工程检测尤其是焊接检验中应用最广泛,历史最悠久的一种无损检测方法。

射线检测利用X射线、 γ 射线、中子射线、高能射线等各种射线对物质的穿透能力。以及射线在穿透材料过程中发生的衰减规律来发现工程材料及其构件内部存在的各种形式的宏观缺陷或测定材料的各种性能与物理量。因此,射线检测首先要研究各种射线的获得方法与产生机理,射线的本质与主要性质;其次要研究射线在穿透材料时与物质的相互作用过程及其物理本质,研究射线穿透材料时引起衰减的原因及衰减规律。从而为全面掌握射线检测原理,准确地应用射线检测技术去解决工程检测中的各种实际问题打下一个良好的物理基础。

第一节 物质结构、原子辐射与元素周期律

研究射线产生的机理、射线与物质相互作用的物理过程,都要涉及到物质的微观结构。因此,物质结构理论是射线检测的理论基础。

近代物理及物质结构理论已经证明:物质是由分子组成的,分子是由原子组成的,原子是由原子核以及核外电子组成的。

一、物质的分子结构

自然界中的一切实物物质都是由分子组成的,分子是保持物质一切性质并能单独存在的最小微粒。物质中的分子总是在不停地运动着,彼此之间保持着一定的距离。物质在不同条件下一般具有固、液、气三种形态,这主要是由于分子之间的距离发生了变化而形成的。当物质物态变化时,它的分子本身不发生变化。但当物质发生化学变化时,分子就起了变化,组成分子的原子重新组合,转化成其他物质的分子。

分子是由原子构成的。原子与原子相互结合形成分子时,原子间存在着强烈的相互作用。化学上,把分子中相邻原子或离子间的这种强烈的相互作用或化学亲和力称为化学键。原子通过化学键的联接,相互结合形成分子。由于各种物质的分子结构不同,组成分子的原子间彼此结合的方式也不同,因此就形成了不同类型的化学键。化学键最基本的类型有三种:离子键、共价键和金属键。

(1) 离子键:当活泼的金属元素原子与活泼非金属元素原子互相接近时,前者容易失去最外层电子而成为正离子,后者容易获得电子而成为负离子,离子由于库仑力的作用而形成分子。这种由正离子、负离子之间通过静电作用而形成的化学键,叫作离子键。

(2) 共价键:当某些非金属的单质或化合物分子内的原子互相结合时,每一个原子的内电子仍分属于各原子,而外电子则会成对的围绕两个原子运动,即为两个原子所共有。原子共有的电子都是成对的。两个相结合的原子所共有的成对电子称为电子对。原子间

通过电子对而形成的化学键,叫作共价键。共价键又称为原子键。原子通过共价键结合时,凡由一对共用电子对形成的共价键叫作单键;由二对或三对共用电子对形成的共价键叫作双键或三键。

(3) 金属键:在金属内部的金属原子、金属正离子及自由电子之间存在的结合力。由于金属的电负性(得电子能力)小,外层价电子易脱离原子束缚而成为自由电子,可以自由地在金属原子间运动,成为金属原子或失去电子后的离子所共有。这些共有的自由电子把金属原子或离子结合在一起。这种金属中特有的结合力称为金属键。

二、原子结构

分子由原子构成,原子是不能用化学方法分解下去的最小微粒。过去人们曾把原子想像为构成物质的最小单元。但自从 1897 年汤姆逊证实了阴极射线是带负电的电子而各种原子中都存在这种电子后,那种将原子想像为不可分割的,构成物质最小单元的观念就被否定了。原子内部结构是什么样的?人们曾提出了各种设想。1912 年英国物理学家卢瑟福以 α 粒子的散射实验为基础提出了原子的核模型,认为原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成,并为尔后的许多实验所证实,很快被人们公认。而原子内部电子的结构与运动规律是什么样的?原子的发射光谱与原子结构有什么关系?1913 年丹麦科学家玻尔在核模型的基础上提出了氢原子理论,较好地解决了氢原子的结构、电子运动规律与发射光谱之间的关系,与实验值很好地符合。但玻尔的理论在解释稍复杂一些原子的结构及实验结果时又遇到了困难。自从 1925 年量子力学建立以后,随着量子力学的发展,原子结构的理论才日趋完善。

(一) 原子的组成

原子由位于原子中心的原子核和绕核高速旋转的电子组成。最简单的氢原子结构如图 1-1 示,原子核带有正电荷,集中了几乎原子的全部质量,占了全部原子质量的 99.9% 以上。但它只占有极小的体积,原子核直径的数量级仅有 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{m}$,而原子的轨道直径数量级为 10^{-10}m 。原子核的直径只有原子直径的数万分之一,体积仅占原子体积的几千亿分之一。相对来说原子里有一个很大的空间,因此高能电子或光子可以很容易地穿入原子,而与原子的任一部分相碰撞。如元素的原子序数为 Z ,原子核所带正电荷电量为 $+Ze$,其中 e 为电子电荷。正常情况下,核外有 Z 个电子绕核旋转,其总的负电荷量为 $-Ze$,即原子是电中性的。

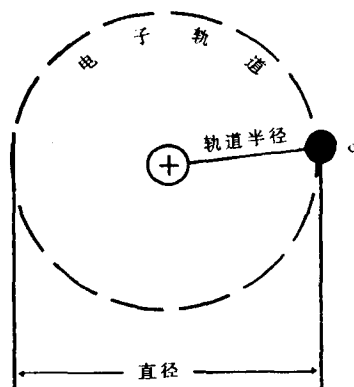


图 1-1 氢原子结构示意图

原子核由质子和中子组成。质子和中子统称核子,质子质量是电子质量的 1840 倍,带有一个单位的正电荷,其带电量与电子电量相等。中子不带电,其质量与质子质量近似相等,都约为 $1.67 \times 10^{-24} \text{g}$ 。

绕核旋转的电子质量很轻,带有负电荷 $-e$ 在物质结构理论中,往往把电子电荷 e 作为电荷单位,即电子带有一个单位的负电荷,而质子带有一个单位的正电荷。

质子、中子、电子都是构成原子的基本粒子,它们的基本情况见表 1-1:

表 1-1 构成原子的基本粒子

名 称	代表符号	电量,C	质量,kg
电 子	e	-1.6021×10^{-19}	9.10908×10^{-31}
质 子	p	$+1.6021 \times 10^{-19}$	1.67261×10^{-27}
中 子	n	0	1.67482×10^{-27}

由于原子及组成原子的基本粒子的质量都很小,科学上往往不用绝对质量而用相对质量的概念来表示它们的质量。国际上规定以碳-12(^{12}C)原子质量的 $1/12$ 即 $0.1661 \times 10^{-26} \text{kg}$,叫作一个原子质量单位,其符号为 u。其他原子、粒子的质量都和这个标准进行比较,所得数值就是其相对质量。若以相对质量表示,则质子质量为: $m_p = 1.00758 \text{u}$,中子质量为 $m_n = 1.00815 \text{u}$ 。质子、中子的质量数都约为 1u。电子质量很小,仅为质子质量的 $1/1836$,往往忽略不计。因此有如下关系:

原子的质量数(原子量)=质子数+中子数或写为:

$$A = Z + N \quad (1-1)$$

而原子的核电荷数=质子数=电子数=元素的原子序数 Z。

原子核中质子之间存在着很大的静电斥力,显然不是静电库仑力把质子和中子聚集成原子核的,但也不可能是万有引力,因为它比静电力还小 10^{39} 倍。那么是什么力使质子、中子紧密地聚集在一起呢?研究发现这是一种强相互作用力,称为核力。核力具有以下三种性质:

- (1) 核力比电磁力强 100 多倍,是强相互作用力。
- (2) 核力是短程力,只能在极短的距离内起作用。距离的等级相当于核的直径 (10^{-15}m)。
- (3) 核力具有饱和性。这导致了核体积与核子数成正比,并维持各种核具有同一密度。

核力的这些特点,就是质子与中子极为紧密地聚集在一起构成原子核的原因。核物质的密度高达 $1.16 \times 10^8 \text{t/cm}^3$,每个核子在核中的结合能有几个到十几个兆电子伏。

(二) 原子的壳层结构

原子核位于原子中心,而核外电子就像行星一样,以约 10^6m/s 的高速绕核旋转。电子在核外空间的运动十分复杂,有时离核近,有时离核远,与普通宏观物体的运动规律存在着根本的不同。科学上不能准确地测出某一时刻它的位置和速度,也不能确定电子的运动轨迹。由于电子以极高的速度绕核旋转,因此可以用电子在核外原子空间各部分中出现的几率来描述电子的运动状态并进行计算。计算结果表明:电子在原子空间中的运动,有时出现在这里,有时出现在那里,犹如一团云雾包围着原子核,称为电子云。通常能量低的电子在离核近的区域里运动,能量高的原子在离核远的区域里运动。

原子核外电子的结构是与电子的运动状态紧密相联的。

1. 电子壳层

原子核与电子之间存在的静电引力将电子束缚在原子内,并不断地改变着电子的运动方向,使电子沿着圆周轨道绕核旋转。以结构最简单的氢原子为例,它的原子核只有一个质子,核外只有一个电子。原子物理学家玻尔认为经典的牛顿运动定律在原子中仍然适用,则由静电引力提供向心力,以速率 v 绕核作圆周运动的动力学方程为:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad (1-2)$$

玻尔引用量子论提出了一个假设:电子只能在一些不连续的特定轨道上运动,这些可能存在的特定轨道称为量子轨道。量子轨道必须满足下列量子化条件:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (1-3)$$

其中 h 为普朗克常数, $n=1,2,3,\dots$ 称为量子数。由以上式(1-2)和(1-3)二个方程中消去 v ,就得出量子轨道半径 r_n 为:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi m e^2} \quad (1-4)$$

式中: r_n 为氢原子中量子数为 n 的电子轨道半径;

ϵ_0 为真空中的介电常数;

h 为普朗克常数;

m 为电子质量;

e 为电子电量。

可见核外电子只能在由量子数 n 决定的一些半径不连续的特定圆周轨道上运动。

对于原子序数 $Z>1$ 的多电子原子,核外 Z 个电子又是如何分布的呢?索莫菲等人将玻尔理论加以推广和发展,引进“电子壳层”的概念。指出量子数为 n 的轨道不只一个,这若干量子数相同的轨道构成一个“电子壳层”。原子核外的电子是分层排布的。对应于量子数 $n=1,2,3,4,5,6,7,\dots$,电子壳层离核由近及远,分别称为 $K,L,M,N,O,P,Q,\dots$ 等电子壳层。图 1-2 给出了一些多电子原子的电子壳层结构。

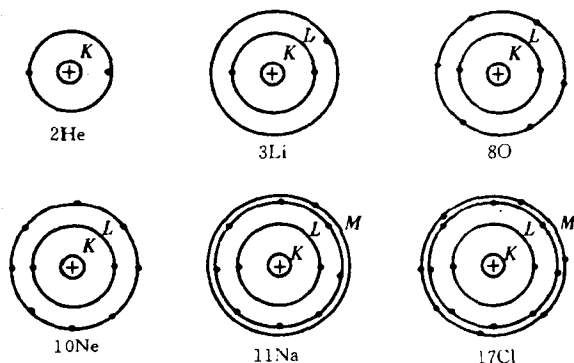


图 1-2 多电子原子结构示意图

2. 支壳层(电子亚层)

在同一电子壳层中由于电子能量稍有差别,且电子云的形状不相同,因此又分成几个支壳层(电子亚层)。

支壳层可用值 l 表示, l 与电子壳层的关系为: $l=0, 1, 2, \dots, n-1$, 可用名称 $s, p, d, f, \dots$ 等符号表示。由此可见量子数为 n 的壳层由 n 个支壳层组成。而不同支壳层电子云的形状是不同的。 s 支壳层的电子云是以核为中心的球体; p 支壳层的电子云是哑铃形; d 支壳层的电子云在空间呈花瓣形; f 支壳层电子云形状就更复杂, 不作一一介绍了。

3. 电子轨道

电子云不仅有确定的形状, 而且有一定的空间伸展方向。在一定的支壳层中电子有几种不同的伸展方向, 每一种伸展方向占据一定的空间。我们把在一定的电子壳层(n)上, 具有一定形状(l)和一定伸展方向的电子云所占据的空间称为一个电子轨道。轨道可用数值 m 表示。每一支壳层上轨道数为: $m=2l+1$ 。

4. 电子自旋

电子不仅在核外原子空间中绕核转动, 而且它本身还作自旋运动。电子自旋有两种方向常用数值 m_s 表示。 m_s 只有两种取值, 当 $m_s = +\frac{1}{2}$ 时表示电子是顺时针方向自旋, 可用向上箭头“ $\uparrow$ ”表示; $m_s = -\frac{1}{2}$ 表示电子逆时针方向自旋, 可用向下箭头“ $\downarrow$ ”表示。

总之, 确定电子的运动轨道需要 n, l, m 三个值, 而确定一个电子的运动状态, 则需要 n, l, m, m_s 四个值。

5. 原子核外电子的排布规律

核外电子的排布遵循以下规律:

(1) 泡里不相容原理: 在同一原子中, 不可能有运动状态完全相同的电子存在, 亦即不可能有四个量子数(n, l, m, m_s)完全相同的电子。根据这一原理, 每一个轨道中只能容纳两个自旋方向相反的电子。据此可推算出各个电子壳层可容纳的最多电子数。

$$Z_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2 \quad (1-5)$$

即在第 n 壳层上, 最多可容纳 $2n^2$ 个电子。凡是布满了 $2n^2$ 个电子的壳层称为闭合层。各电子壳层最多能容纳的电子数见表 1-2。

表 1-2 各电子壳层最多能容纳的电子数

主量子数 n	1	2	3	4	5
电子壳层	K	L	M	N	O
$Z_n = 2n^2$	2	8	18	32	50

(2) 能量最低原理: 降低体系能量是自然界的普遍规律。自然界一切体系都会自发地从能量高的不稳定状态趋向能量低的稳定状态。核电子排布遵循能量最低原理, 总是首先占领能量最低的轨道。只有当能量最低的轨道被占满后, 电子才依次进入能量较高的轨道, 使原子能量处于最低状态。这时的原子才是最稳定的。

原子轨道能量的高低是根据光谱实验确定的。我国科学家徐光宪从光谱实验数据中归纳出判断原子轨道能量相对大小的规则: 即判据 $n+0.7l$ 。凡 $n+0.7l$ 值大的能量就高,

反之能量就低。据此可判断各轨道电子能量的相对大小,并排出能量相对大小的顺序。原子中电子的排布首先从靠近原子核的 $n=1$ 层开始,布满第一层后布第二层,但从第三层、第四层开始电子的排布在壳层间会有交错,所遵循的就是以上的能量最低原理和轨道电子能量大小的判据。

三、原子能级、原子辐射

(一) 原子能级

玻尔的氢原子理论假设:

1. 原子只能处在一系列不连续的能量状态。在这些状态中原子是稳定的,这些状态称为定态。处于定态中运动的电子虽然有加速度,也不会发生能量辐射。由于吸收、放射辐射或由于碰撞发生能量变化时,只能由一个定态跃迁到另一个定态,而不能任意连续地改变。

2. 原子从一个定态跃迁到另一个定态时,它将发射或吸收单色辐射。辐射频率 ν 决定于下列关系式:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1-6)$$

3. 原子的不同能量状态对应于电子的不同轨道分布。

根据玻尔的假设,电子在任何一个轨道上运动时,氢原子都具有确定的能量。当电子在量子数为 n 的轨道上运动时,它具有的动能为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-7)$$

电子在原子核电场中所获得的电势能

$$E_p = (-e) \cdot \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \quad (1-8)$$

将式(1-2)代入(1-7)式,便可得到:

$$E_n = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \quad (1-9)$$

将式(1-4)代入上式,便可得到氢原子能量公式:

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2} \quad (1-10)$$

上式表示电子在第 n 个稳定态中原子系统的能量,同时表明氢原子的总能量为负值,这表明电子和原子核结合成原子时能量减少,电子被原子核束缚。或者要把电子从原子中移走,外力必须对电子作功。

由上式可以看出氢原子的能量与电子所在轨道有关。量子数 n 越大轨道离核越远,原子能量越大;反之,量子数 n 越小,轨道离核越近,原子能量越小。当量子数 n 取不同值时即可得到原子在不同定态中不连续的能量值。

我们常用能级这一概念来表示原子系统的能量状态。原子中的电子可以处在不同的运动状态,对应着这些状态的原子系统具有不同的能量。这些能量是不连续的,也就是量子化的。这种量子化的能量值称为原子能级,简称能级。

如果按一定比例关系把这一系列不连续的能量值按它们的大小排列起来,用一系列间距不等的平行线来表示,就可以得到原子的能级图。图 1-3 分别给出了氢原子和钨原子

的能级图。

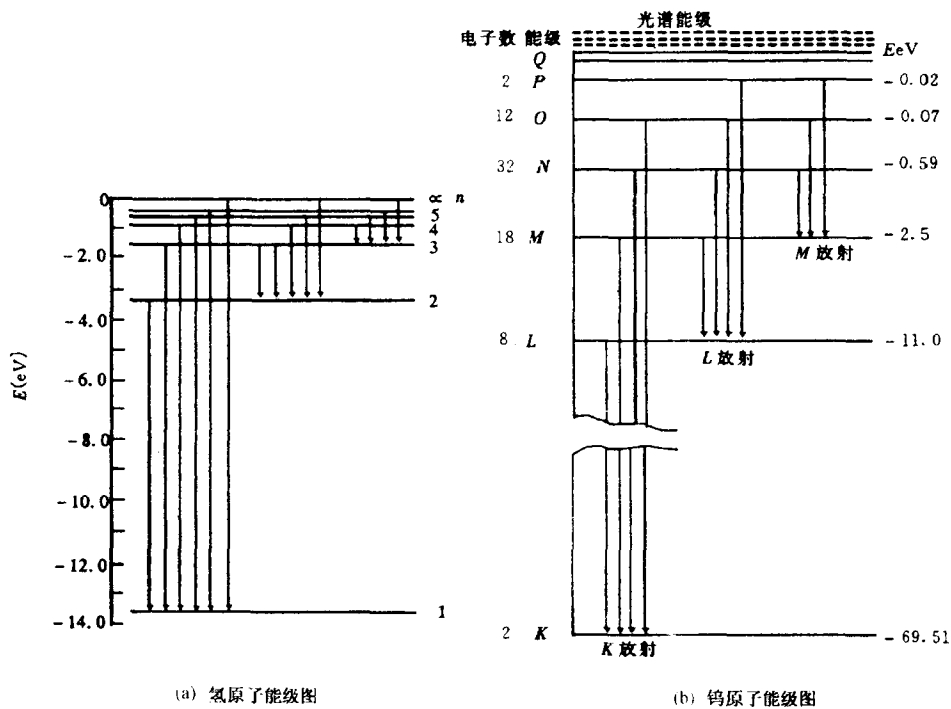


图 1-3 原子能级图

(二) 原子辐射

正常情况下,原子中的电子总是在能量最低的轨道上运动。这时的原子处于最低能量状态,此时电子也最稳定,这一状态称为正常态或基态。当受到外来辐射照射或与高能粒子碰撞时,电子吸收了一定大小的能量后,就可以跃迁到能量较高的轨道上去。此时的原子处于高能态或称激发态。这个过程称为原子的激发。只有当电子吸收的能量等于两个可能轨道的能级差时激发过程才会发生。

处于激发态的原子能量较高因而不稳定的。通常激发态原子中的电子会自发地跃迁到能量较低的基态,伴随发生轨道跃迁、能级跃迁并发出单色辐射。所辐射光子能量等于电子在跃迁前后轨道的能级之差,即:

$$h\nu = E_n - E_m \quad (1-11)$$

E_n 、 E_m 分别表示电子在跃迁前后所在轨道的能级值。

原子辐射可分为两个类型。第一,当电子在原子外部壳层各轨道能级之间跃迁时所产生的光谱称为光学光谱。由于原子外壳层轨道能级差较小,所发出的辐射频率较低,一般在可见光区或其附近。第二,当原子内壳层电子被激发而产生轨道能级跃迁时,由于原子内壳层能级差大,所产生的辐射频率很高,称为线状伦琴光谱,即标识 X 射线。

原子的激发和辐射如下图(图 1-4,图 1-5)所示。

四、元素、元素周期律

(一) 元素

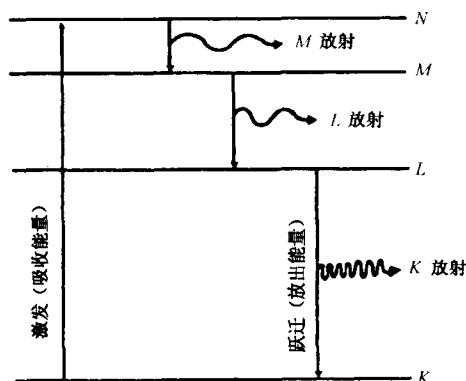


图 1-4 原子的激发和跃迁

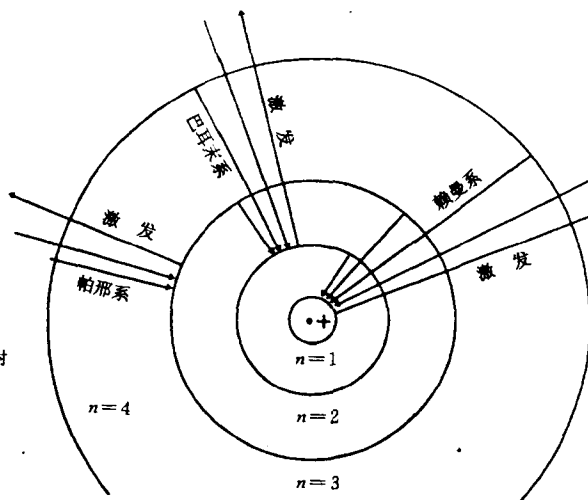


图 1-5 氢原子状态的过渡图

具有相同核电荷数的原子性质相同,化学上把性质相同的这一类原子称为元素。

元素常用元素符号表示,若元素的符号为 X ,原子量为 A ,原子序数为 Z 则元素原子可用 ${}_Z^AX$ 来表示,例如氢元素原子的表达式为 ${}_1^1\text{H}$,铁元素原子的表达式为 ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ 钨元素原子的表达式为 ${}_{74}^{184}\text{W}$ 等。

(二) 元素周期律

按原子序数或核电荷数由小到大的顺序进行排列,研究元素性质的变化时发现,元素性质随原子序数或核电荷数的递增呈周期性变化,这个规律称元素周期律。按元素周期律将 107 种元素进行排列,得到元素周期表,它具体地表示出了元素性质变化的周期律。

在化学反应中原子核不发生变化,仅有核外电子发生了变化。核外电子得失的难易程度以及得失的电子数目,对元素性质起着决定性的作用。决定元素性质最主要的是原子的最外层的电子结构。随着核电荷数目的增加,元素性质发生周期性的变化,实际上反映的是原子核外电子排布的周期变化,也即是原子最外层电子结构发生的周期变化。

1869 年俄国科学家门捷列夫发现了元素周期律并提出了第一个元素周期表,将当时已知的 63 种元素全部填入表中,且留下了空位,预言了未知元素的存在,并为以后的事实所证明。

第二节 X 射线的发生与 X 射线谱

1895 年 11 月 8 日德国物理学家,渥茨堡大学教授伦琴·威廉·康拉德(W·K·Röntgen)在研究阴极射线管中的真空放电现象时,发现了一种新的不可见的射线。这种射线具有极强的穿透能力,并能使铂氰化钡等物质发出荧光。由于当时对这种射线还不够了解,便借用了数学上代表未知量的符号,命名为 X 射线。后人为了纪念伦琴教授的功绩,又把 X 射线称为伦琴射线。X 射线的发现在人类科学史上具有重要意义,为自然科学和医学的发展作出了重要贡献。为此,伦琴教授于 1901 年获得了“诺贝尔”奖金。

就在伦琴教授发现 X 射线的第二年,法国科学家贝克勒尔首先发现了铀盐的放射性,接着居里夫妇又发现了放射性元素镭,从此开创了放射物理学发展的新纪元。20 世纪 30 年代人们又发现了中子射线。这一切都为射线在工业检测中的应用奠定了基础。

一、X 射线的产生

X 射线发现以后,科学家们致力于研究产生 X 射线的方法。通过大量实验他们发现:当高速运动的电子被突然阻止时,伴随着电子动能的消失和转化,能够产生 X 射线。现在应用的所有 X 射线发生装置,都是利用高速运动电子去轰击靶物质而产生的。分析总结应用各种不同装置产生 X 射线的实验,人们发现:为了获得 X 射线,必须具备以下三个基本条件:

(1) 产生并发射自由电子,从而获得自由电子源。例如,可以应用真空中的热电子发射。

(2) 在真空中,沿一定方向加速自由电子,从而获得具有极高速度和动能作定向运动的打靶电子流。在一般工业 X 射线管中往往用直流高压电场加速电子,而在产生高能射线的加速器中也可应用高能的电磁场加速电子。要求一个较高真空度的空间,主要是为加速电子提供一个通道,避免在加速过程中与气体分子碰撞而降低能量。同时,也能保护灯丝及靶材料,不致因氧化而被烧毁。

(3) 在高速运动电子流的运动路径上设置坚硬而耐热的障碍物——靶,使高速运动的电子与靶相碰撞,突然受阻而骤然遏止。这样就会产生能量转换,从而获得我们所需要的 X 射线。

二、射线的量和质:

由射线发生装置产生的射线,可以用量和质来表示它们的特性。

射线的量往往用射线强度来表示;而射线的质又称线质往往用射线的硬度来表示。

(一) 射线的强度 I

单位时间内在垂直于射线传播方向的单位面积上所通过的射线能量。称为射线强度。射线强度的单位在 SI 制中为 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 或焦耳/(\(\text{米}^2 \cdot \text{秒}\))。

由以上定义不难看出,强度的实质是指射线的能流密度。

射线的强度 I 是由单位时间内通过垂直于传播方向上单位面积的光子数与每个光子能量 $\epsilon = h\nu$ 两个因素决定的。

对于由相同能量光子组成的单色谱,其辐射强度为:

$$I = N \cdot h\nu \quad (1-12)$$

其中: N 为每秒内通过单位面积的光子数。 $h\nu$ 为光子能量。

对于由几种特定能量光子组成的多能谱,其辐射强度为:

$$I = N_1 h\nu_1 + N_2 h\nu_2 + \cdots + N_n h\nu_n \quad (1-13)$$

其中, $N_1, N_2, \cdots, N_n$ 为每秒内通过单位面积上能量分别为 $h\nu_1, h\nu_2, \cdots, h\nu_n$ 的光子数。

对于由从最短波长为 $\lambda_{\min}$ 开始,对应能量连续变化的连续谱,最短波长对应的最大能量为 $\epsilon_{\max}$,则辐射强度为:

$$I = \int_0^{\epsilon_{\max}} N(\epsilon) \epsilon d\epsilon \quad (1-14)$$

此时每秒内通过单位面积的光子数 $N(\epsilon)$ 是能量为 ϵ 的光子个数。

辐射场中各点的射线强度不仅决定于射源在单位时间内辐射的总能量,还决定于射线束在辐射场中的扩散情况。

当已知射线强度时,单位时间内通过面积 S 的射线能量 E 为:

$$E = IS \quad (1-15)$$

(二) 射线的硬度

又称射线线质,系指射线光子能量的大小或贯穿物质能力的大小。

由公式 $\epsilon = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ 可知:波长短的射线,光子能量大,穿透能力强,称这种射线线质“硬”;反之,波长长的射线,光子能量小,穿透能力弱,称这种射线线质“软”。

对 X 射线说来,辐射的线质决定于管电压。管电压越高,辐射的 X 射线线质越硬,管电压越低,辐射的 X 射线线质越软。

对 γ 射线说来,所辐射的光子能量则取决于射线源的种类。

一般 X 射线可根据穿透能力划分其硬度。软、硬 X 射线的划分,可见下表 1-3

表 1-3 软、硬 X 射线的划分

X 射线的质	管电压, kV	波长, 10^{-10}m
很 软	≤ 20	≥ 0.62
软	20~60	0.62~0.21
半 软	60~150	0.21~0.08
硬	150~400	0.08~0.03
很 硬	≥ 400	≤ 0.03

三、X 射线谱

(一) X 射线谱

高速电子流撞击到靶物质上将产生 X 射线。X 射线的强度 I 随波长 λ 的分布曲线称 X 射线谱,又称 X 射线谱曲线。

(二) X 射线谱的组成

对 X 射线谱系统的研究发现,由高速电子流撞击阳极靶所产生的 X 射线是由两种谱线组成的。这两种谱线分别为:连续 X 射线谱与特征 X 射线谱。

(三) 连续 X 射线谱

从最短波长开始,强度随波长的增大连续平滑的变化,直到波长延伸到很长。这种谱线称为连续 X 射线谱。例如钨靶在 20kV 以下产生 X 射线,钨靶在 70kV 以下产生的 X 射线,都是连续谱。如图 1-6、图 1-7 所示。

连续谱产生于轫致辐射过程。高速运动电子轰击靶时,在接近原子核的过程中,受到核外库仑场的作用而急剧减速。经典电动力学的理论证明,作加速运动的电子将向空间产生电磁辐射,这种辐射称为轫致辐射。

高速运动电子与靶材料原子碰撞时,由于碰撞条件和过程是千变万化的,因此,每次碰撞时损失的动能也各不相同。每次碰撞电子所消耗的能量,部分用于阳极物质中各种不同的激发过程,其余则转化为电磁辐射或光子能量。因此有: