

数字射线

无损检测技术



郑世才◎编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

数字射线

无损检测技术

郑世才 编著



机械工业出版社

无损检测技术主要是对材料、工艺、工件服役过程产生的宏观缺陷进行检验的技术,也包括评定材料或工件的完整性、特性和组成等。检验技术基于物理原理,所提出或应用的检验技术不损害被检对象的性能与结构完整性。

无损检测技术是材料研究、工艺研究、结构设计的基本支持技术之一,是产品质量检验和保证的重要手段。在设计阶段,应用无损检测技术可以验证设计思想是否正确;在制造阶段,无损检测技术可以进行工序(工艺)质量的检验,并可提出改进工艺的建议;在服役阶段,无损检测技术可以检测性能的变化、缺陷的扩展和监测工作状况,为评定工作状况可靠性提供数据。

作为最基本的无损检测技术之一的射线检测技术,从20世纪20年代进入工业应用以来,检测技术的发展已有近90多年的历史。到现在,在工业应用领域已形成了由射线照相技术(Radiography)、射线实时成像技术(Radioscopy)、射线层析成像技术(Tomography)构成的比较完整的射线无损检测技术系统。近年,从获得的图像角度,将射线检测技术分为常规射线检测技术和数字射线检测技术。常规射线检测技术主要是指采用胶片完成的射线照相检测技术。数字射线检测技术(Digital imaging in radiology)是在计算机和辐射探测器发展的基础上,建立起来的可获得数字化图像的射线检测技术。

从20世纪80年代中后期,数字射线检测技术开始进入工业应用领域。最初,或许比较强调直接获得数字化图像的射线检测技术。但到目前,数字射线检测技术已形成了三个部分:直接数字化射线检测技术、间接数字化射线检测技术、后数字化射线检测技术。当使用缩写“DR”时,通常指的是直接数字化射线检测技术(Direct radiography)。

直接数字化射线检测技术是指采用分立辐射探测器完成的射线检测技术,这种技术在辐射探测器中完成图像数字化过程,直接给出数字化的射线检测图像。间接数字化射线检测技术,是指图像的数字化过程需要作为单独技术环节完成的射线检测技术。后数字化射线检测技术是特殊的技术,它是采用图像数字化扫描装置将射线照相底片图像转换为数字图像的技术。此外,CT技术、康普顿散射层析成像技术,可认为是特殊的数字射线检测技术,是可获得层析数字图像的技术。

数字射线检测技术可简单地完成图像采集、图像处理,可方便地实现信息交换,可建立射线检测技术工作站等。但目前,数字射线检测技术获得的检测图像,与常规(胶片)射线照相检验技术获得的检测图像比较,基本特点是动态范围大,空间分辨率低,这使其在工业领域的应用受到了一些限制。提高数字射线检测技术

水平最关键的问题是改进和提高辐射探测器性能,国外在这方面正进行研究,并已制定了一系列数字射线检测技术标准,推动了数字射线检测技术的应用和发展。

数字射线检测技术与常规(胶片)射线照相检测技术比较,基本的不同是采用了辐射探测器代替胶片完成射线信号的探测和转换,采用了图像数字化技术。这使射线检测技术出现了新的过程,使检测图像具有了新的特点,对技术控制产生了新的要求。系统地给出数字射线检测技术有关的知识和理论,是正确应用数字射线检测技术必须解决的基本问题。这是编写本书的基本考虑。

从构成基本完整的数字射线检测技术的基本理论考虑,本书的主要内容包括简要的射线检测技术的物理基础,数字射线检测技术的主要设备、器材(特别是辐射探测器),数字射线检测技术理论,数字射线检测基本技术,数字射线检测常用技术,底片图像数字化扫描技术等。本书的核心内容是,从成像过程的基本理论和数字图像的基本理论,给出了射线检测数字图像的基本理论,并在此基础上阐述数字射线检测的基本技术。数字射线检测技术在应用时,目前必须考虑其与胶片射线照相检验技术是否具有同等的缺陷检验能力,也就是“等价性”问题。对此,本书以单独一节进行了简要讨论。希望本书能为正确理解和掌握数字射线检测技术提供帮助,能为正确应用数字射线检测技术提供帮助。

本书内容依据的是编写者多年从事射线检测技术工作的经验、掌握的射线检测技术理论、积累的相关理论知识及近几年进行的数字射线检测技术的试验结果,也包括对国外数字射线检测技术标准规定的一些分析研究等。

编写本书内容时,对相关理论知识处理的基本考虑是,以满足无损检测人员的知识要求为准则。作为国内首次对数字射线检测技术的理论、技术的构筑,其中的理解和总结可能存在不当甚至错误的地方,热诚欢迎批评指正。

郑世才

目 录

前言

第1章 射线检测技术的物理基础	1
1.1 射线概念	1
1.1.1 射线分类	1
1.1.2 X射线	2
1.1.3 γ 射线	6
1.2 射线与物质的相互作用	8
1.2.1 光电效应	8
1.2.2 康普顿效应	10
1.2.3 电子对效应	10
1.2.4 瑞利散射	11
1.3 射线衰减规律	12
1.3.1 基本概念	12
1.3.2 单色窄束射线衰减规律	13
1.3.3 宽束连续谱射线的衰减规律	14
1.4 射线检测技术的基本原理	17
第2章 射线机与像质计	19
2.1 X射线机	19
2.1.1 X射线机的基本结构	19
2.1.2 X射线管	22
2.1.3 X射线机的类型	25
2.1.4 X射线机的技术性能	26
2.2 γ 射线机	30
2.3 加速器	32
2.4 像质计	33
2.4.1 像质计概述	33
2.4.2 射线检测的常规像质计	34
2.4.3 双丝型像质计	38
2.5 线对卡	40
第3章 辐射探测器	42
3.1 辐射探测器概述	42
3.2 辐射探测器的物理基础	43
3.3 半导体辐射探测器	47
3.3.1 半导体辐射探测器的原理	47

3.3.2 半导体辐射探测器的基本结构	48
3.3.3 非晶硅辐射探测器	49
3.3.4 非晶硒辐射探测器	51
3.3.5 闪烁体结合 CCD (或 CMOS) 探测器	51
3.4 闪烁辐射探测器	52
3.4.1 闪烁辐射探测器的原理与结构	52
3.4.2 光电倍增管	53
3.4.3 图像增强器	54
3.4.4 IP 板	56
3.5 气体辐射探测器	57
3.6 A/D 转换器	60
第 4 章 成像过程基本理论	62
4.1 成像过程概念	62
4.2 成像过程的空间域分析	63
4.3 成像过程的空间频域分析	65
4.4 线扩散函数、边扩散函数与不清晰度	69
4.5 瑞利判据	72
第 5 章 数字图像基本理论	74
5.1 数字图像概念	74
5.2 图像数字化过程	75
5.2.1 采样与采样定理	75
5.2.2 图像幅值量化	78
5.2.3 数字化对图像的影响	80
5.3 数字射线检测图像质量	82
5.3.1 数字射线检测图像的对比度	82
5.3.2 数字射线检测图像的空间分辨率	83
第 6 章 数字射线检测基本技术	88
6.1 数字射线检测技术的基本过程	88
6.2 数字射线检测技术控制的基本关系式	89
6.2.1 检测图像对比度	89
6.2.2 检测图像不清晰度	90
6.3 透照技术	92
6.3.1 透照布置	92
6.3.2 透照参数	94
6.3.3 最佳放大倍数	95
6.3.4 散射防护	96
6.4 图像数字化技术	98
6.4.1 图像数字化技术概述	98
6.4.2 直接数字化技术辐射探测器选择	98
6.4.3 间接数字化技术的图像数字化技术控制	100

6.4.4 射线源焦点尺寸选择	101
6.5 图像显示与观察技术	102
6.5.1 图像显示与观察的视觉理论基础	102
6.5.2 显示器的基本性能	103
6.5.3 数字图像处理技术	104
6.6 数字射线检测技术近似设计	108
6.6.1 概述	108
6.6.2 检测图像常规像质计指标设计	109
6.6.3 检测图像空间分辨率指标设计	110
6.6.4 数字射线检测技术近似设计实例	115
6.7 等价性问题讨论	116
6.7.1 等价性问题概述	116
6.7.2 射线检测技术系统的分析	117
6.7.3 等价性具体问题分析	118
6.7.4 等价性厚度范围问题的其他处理方法	124
第7章 常用数字射线检测技术	127
7.1 分立辐射探测器直接数字化射线检测技术	127
7.1.1 直接数字化射线检测技术系统	127
7.1.2 直接数字化射线检测技术控制	130
7.1.3 检测图像质量要求与技术应用	132
7.2 CR 技术——IP 板间接数字化射线检测技术	133
7.2.1 CR 技术检测系统组成	133
7.2.2 CR 技术控制	136
7.2.3 CR 技术的图像质量控制	139
7.3 图像增强器间接数字化射线检测技术	140
7.4 微焦点数字化射线检测技术	143
第8章 底片图像数字化扫描技术	147
8.1 扫描仪	147
8.1.1 扫描仪概述	147
8.1.2 扫描仪的基本性能指标	148
8.2 扫描技术	151
8.2.1 图像扫描的基本过程	151
8.2.2 空间分辨率设置	151
8.2.3 扫描图像的后期处理	153
8.3 扫描仪选用	154
附录	156
附录 A 卷积概念与傅里叶变换概念	156
附录 B 采样定理的进一步说明	164
附录 C 射线照相检测技术的缺陷检验理论	166
参考文献	170

第1章

射线检测技术的物理基础

1.1 射线概念

1.1.1 射线分类

射线是具有一定穿透物体能力的辐射。一般地，射线可以分为两类，一类是电磁辐射，另一类是粒子辐射。

电磁辐射本质上是电磁波，是在空间传播的光（量）子流。电磁辐射与物质的作用是光子与物质的相互作用。光子不带电荷，静止质量为0，在真空中沿直线以光速 C 传播。不同波长的光，其光子具有不同的能量，光子的能量为

$$\varepsilon = h\nu$$

式中 h ——普朗克常数，值为 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ；

ν ——频率（Hz）。

光子与一般基本粒子的本质不同是它的静止质量为0，即只有当它运动时才具有质量。按照相对论理论，其质量的大小与它的运动速度相关。

工业射线无损检测技术中使用的 X 射线、 γ 射线属于电磁辐射，它们都是具有一定能量的光子流，与可见光在本质上完全相同。但 X 射线和 γ 射线是波长很短的电磁波，它们的光子能量远大于可见光，所以在性质上与可见光又存在明显的不同。

粒子辐射是指各种粒子射线，如 α 粒子、 β 粒子、质子、电子、中子等，它们都属于粒子辐射。这些粒子都具有确定的静止质量，与物质的相互作用是粒子与物质的作用。但不同粒子的特性不同，与物质作用的机制和过程也不同。

两类辐射在本质上不同，在与物质相互作用时，作用的机制和过程不同，损失能量过程不同，具有各自的规律和特点，因此不能统一地进行简单讨论。也就是说，在讨论射线与物质的相互作用时，必须指明讨论的是哪种射线。

在工业射线无损检测技术中，使用的射线主要是 X 射线、 γ 射线与中子射线，

而一般的射线检测技术使用的仅是 X 射线与 γ 射线，中子射线（主要是热中子）用于一些特殊问题的检测。本书以后的讨论，所称的射线均指 X 射线与 γ 射线。

1.1.2 X 射线

X 射线由高速运动电子的轫致辐射过程产生。即电子接近原子核时，与原子核的电场作用，发生偏转、急剧减速，其动能转化为电磁辐射，产生连续谱 X 射线。轫致辐射也称为碰撞辐射。

在工业射线无损检测技术中，在 X 射线管中产生的 X 射线，X 射线强度随波长的分布如图 1-1 所示，射线强度随波长分布的关系称为 X 射线谱。从图中可以看到，X 射线谱由两部分组成，连续 X 射线谱和特征 X 射线谱（标识 X 射线谱）。

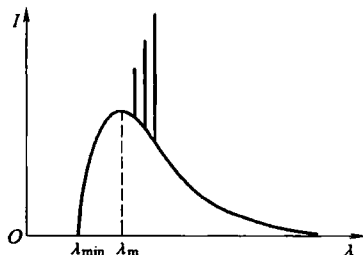


图 1-1 X 射线谱示意图

连续谱是图中从最短波长开始，随着波长的加长强度连续变化的部分。特征谱是在某些

波长部位叠加在连续谱上的线状谱部分。两种谱的特点不同，产生的机理也不同。

连续谱的基本特点可概括为三点：一是在连续的波长范围内存在最短波长 $\lambda_{\min}$ ；二是存在辐射强度最强的波长 λ_m ；三是辐射强度分布与波长相关。

在最短波长与最强波长之间，强度随波长的增加而迅速增加；在最强波长之后，随着波长的增加强度降低；在波长较长部分强度很小。连续谱强度分布的上述特点，可以从一定能量的大量电子在靶面上的减速过程的随机性作出理解。

最短波长和电子加速电压（X 射线管上施加的电压 V ）之间的关系可如下导出。

电子到达阳极时具有的动能为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = eV$$

式中 v ——电子运动速度。

设电子在一次撞击过程损失了全部的动能，从能量守恒定律，则轫致辐射产生的连续谱的最短波长和加速电压之间应有下述关系，即

$$eV = h\nu = \frac{hC}{\lambda_{\min}}$$

式中 C ——光速。

代入各值，则可得到

$$\lambda_{\min} = \frac{12.4}{V} \times 10^{-8} \text{ cm} \quad (1-1)$$

式中 V ——加速电压, kV。

通常认为, 关于连续谱 X 射线某一波长强度的关系式为

$$I(\lambda) = CZ \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{1}{\lambda^2} + BZ^2 \frac{1}{\lambda^2}$$

式中 B 、 C 为常数。由于常数 B 远小于常数 C (适用于波长小于 $5 \times 10^{-10} \text{ m}$ 情况), 故略去第二项, 此式变为

$$I(\lambda) = CZ \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{1}{\lambda^2}$$

通过此式可求得最强波长与最短波长的关系。对此式求偏导数得

$$\frac{\partial I(\lambda)}{\partial \lambda} = CZ \left(\frac{3}{\lambda} - \frac{2}{\lambda_{\min}} \right) \frac{1}{\lambda^3}$$

对于强度最强的波长, 则此导数值应为 0, 即

$$\frac{\partial I(\lambda)}{\partial \lambda} = 0$$

因此有

$$CZ \left(\frac{3}{\lambda} - \frac{2}{\lambda_{\min}} \right) \frac{1}{\lambda^3} = 0$$

解此方程, 得到

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_{\min}$$

即强度最强处的波长与最短波长的关系应满足上述关系。写成通常习惯的样式, 则是

$$\lambda_m = \frac{3}{2} \lambda_{\min} \quad (1-2)$$

这就是连续谱的最强波长 λ_m 与最短波长之间的近似关系。

连续谱总强度与施加的管电压、管电流以及靶物质原子序数相关, 关系式为

$$I = \alpha i Z V^2 \quad (1-3)$$

式中 i ——管电流, mA;

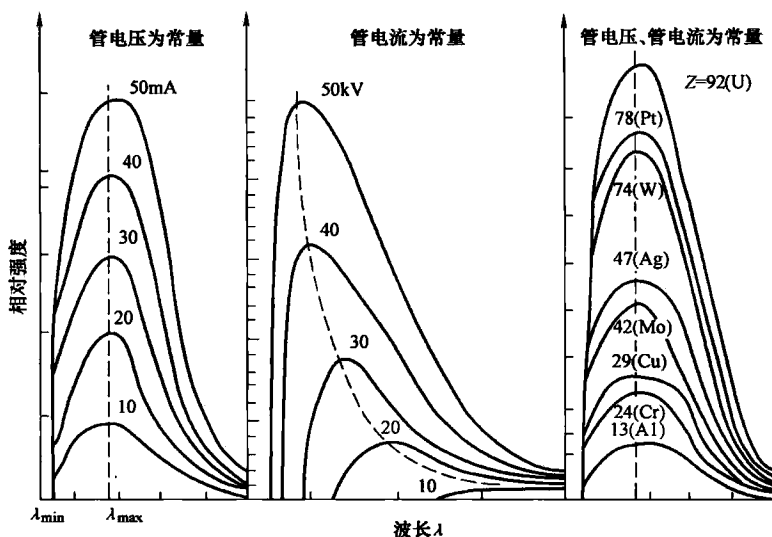
Z ——靶物质的原子序数;

V ——管电压, kV;

α ——系数, 在上述单位下约为 $(1.1 \sim 1.4) \times 10^{-6}$ 。

图 1-2 显示了连续 X 射线谱的强度与管电压、管电流和靶物质原子序数关系的基本特点。

由图 1-1 可知, 叠加在连续谱上的线状谱线, 即仅在某些特定波长位置出现的强度很大的谱线, 称为特征谱 (或标识谱)。特征谱产生于跃迁辐射过程。特征谱

图 1-2 连续 X 射线谱的强度与 V 、 i 、 Z 的关系

线可由一次激发产生，即由电子激发原子的壳层电子产生。特征谱线也可由二次激发产生，即由射线光子激发原子的壳层电子产生。二次激发产生的特征辐射通常称为荧光辐射。

特征谱线是电子在轨道间跃迁时产生的辐射。当加速电压超过一临界值——靶物质的激发电压时，靶物质受电子轰击，其轨道电子可被击出，产生空位，高能轨道电子跃迁到空位时产生辐射，这即是特征谱或标识谱。图 1-3 是特征谱线产生的示意图。特征谱线可以分为系，分别命名为 K 系、L 系、M 系等特征谱线。K 系特征谱线是原子外层轨道的电子跃迁到 K 层轨道时产生的特征谱线，L 系特征谱线是原子外层轨道的电子跃迁到 L 层轨道时产生的特征谱线，M 系特征谱线是原子外层轨道的电子跃迁到 M 层轨道时产生的特征谱线，如此等等。

不同原子具有不同的轨道电子结构，因此不同元素具有不同的激发电压。只有施加的管电压超过靶物质的激发电压时，才可能产生特征谱。图 1-4 是不同元素特征谱的激发电位，表 1-1 列出了部分元素特征谱线的激发电位。

任一特征谱线的波长，与发射体的原子序数相关。谱线频率与发射体原子序数间可建立下面的关系：

$$\sqrt{\nu} = C(Z - \sigma)$$

式中 C ——常数，对所有元素的同一谱线相同，但对不同谱线不同；

σ ——常数，对同一系所有谱线相同。

可见，特征谱线的频率随发射体原子序数的增加而增大，即特征谱线的波长随发射体原子序数的增加而减小。这个关系称为莫塞莱定律，如图 1-5 所示，它显示了不同发射体特征谱线的频率与波长。

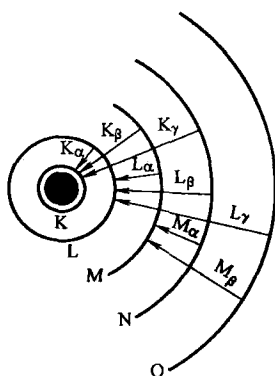


图 1-3 特征谱线产生示意图

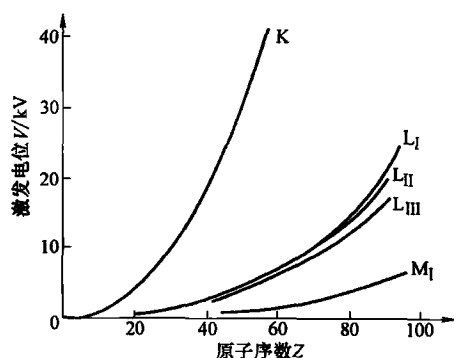


图 1-4 不同元素的特征谱线激发电位

表 1-1 部分元素的特征谱线激发电位

(单位: kV)

元素	Mg	Al	Ti	Fe	Cu	W	Pb
K 系谱线激发电位	1.303	1.559	4.964	7.111	8.980	69.508	88.001
L _I 系谱线激发电位	0.063	0.087	0.530	0.849	1.100	12.090	15.870
M _I 系谱线激发电位	—	—	0.054	0.093	0.135	2.812	3.853

由于存在俄歇效应，导致电子在层间跃迁时，并不都是发射特征谱线，会出现发射俄歇电子的情况。为描述发射特征谱线的情况，在特征谱线研究中引入“荧光产额”这一术语。对于某系特征谱线，荧光产额定义为单位时间发出的该系谱线的全部光子数与同一时期内形成的该系（壳层）空位数之比。荧光产额表述的是某壳层空位被填充并发射特征谱线的概率，但不考虑该壳层空位的产生过程。图 1-6 给出的是荧光产额与元素原子序数的一般关系。

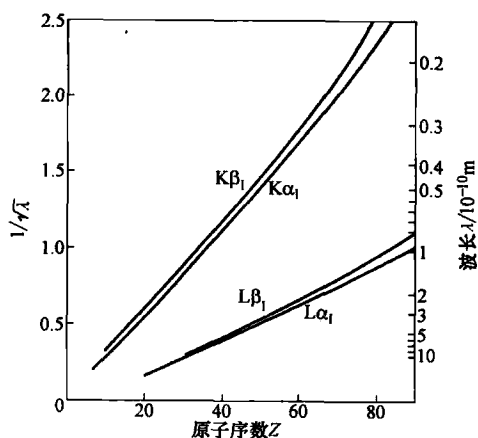


图 1-5 莫塞莱定律

物质（元素）不同，原子的电子层结构不同，特征谱线的结构也不同。由于原子的电子层具有复杂的能级结构，所以特征谱线的每一系也有复杂的结构。特征谱线的这些特点反映了物质原子结构的特点。也正是因为这点，才称这些谱线为特征谱线或标识谱线。从特征谱线的结构和波长能够识别原子的结构特点，能够识别组成材料的元素。例如，X 射线荧光光谱分析技术，可以检查物体表面层的构成元素。

在工业射线无损检测技术中，一般不考虑特征谱线。

1.1.3 γ 射线

γ 射线是波长很短的电磁波，为线状谱射线。 γ 射线穿透物体的能力很强，有的甚至可以穿透几厘米厚的铅板，但它的电离作用却很小。简单说， γ 射线是放射性同位素的原子核发生衰变过程中，处于激发态的核在向低能级的激发态或基态跃迁过程中产生的辐射。显然， γ 射线的产生过程不同于 X 射线的产生过程。不同的原子核具有不同的能级结构，所以不同的放射性元素辐射的 γ 射线具有不同的能量。

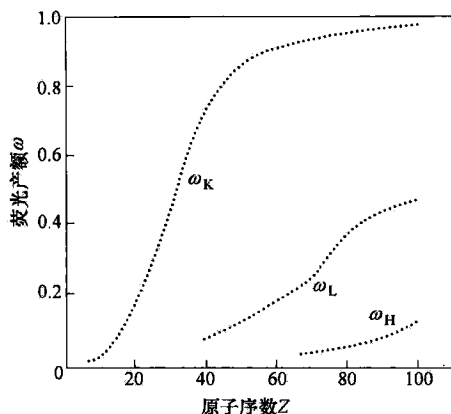
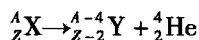


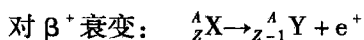
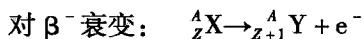
图 1-6 荧光产额与元素原子序数的一般关系

核素（原子核）自发地放射出射线而转变为另一种核素（原子核）的现象，称为放射性衰变。在衰变的过程中电荷数和质量数保持守恒。放射性衰变的主要方式是 α 衰变、 β 衰变及 γ 衰变，此外还有轨道电子俘获 (ϵ 或 EC)、自发裂变 (SF) 等。

α 衰变是指原子核放出 α 粒子的衰变过程。 α 粒子带有两个单位的正电荷，质量数为 4，实际就是氦原子核。它穿透物体的能力很小，在空气中也只能飞行几个厘米，但具有很强的电离能力。以 X 表示原来的核，以 Y 表示衰变后的核，则 α 的衰变过程可写成



β 衰变是指原子核放出 β 粒子的衰变过程。 β 粒子是负电子流或正电子流，它具有较大的穿透能力，甚至可以穿透几毫米厚的铝，但电离作用较弱。放出负电子流的称为“ β^- 衰变”，放出正电子流的称为“ β^+ 衰变”。在 β^- 衰变中，核内的一个中子转变为质子。在 β^+ 衰变中，核内的一个质子转变为中子。 β 衰变可写成如下形式：



在 β 衰变中放出的电子的能量在一个范围内是连续分布的，有一个确定的最大能量。

当一种放射性元素发生连续衰变时，有的过程是 α 衰变，有的过程是 β 衰变，在这些衰变过程中常伴随辐射 γ 射线。这是由于放射性元素的核，经过上述衰变后变成处于激发态的核，当它返回正常态时将辐射 γ 射线，这个过程称为 γ 衰变（也称为 γ 跃迁）。

原子核从激发态向低能态或基态跃迁，除了发射 γ 射线外，还可以通过发射电子的方式完成。在发射电子的方式中，处于激发态的原子核把激发能传给轨道电子，使轨道电子发射出来，同时实现原子核的能态跃迁。这个过程称为内转换，发射的电子称为内转换电子。

轨道电子俘获是指原子核从核外的轨道电子中俘获一个轨道电子的衰变过程。俘获轨道电子后原子核的一个质子转变成中子，生成质量数与母核相同但原子序数前移一位的新核。在轨道电子俘获后，由于在内层轨道上出现电子空位，因此轨道电子俘获一般伴随特征 X 射线发射或俄歇电子发射。通常认为轨道电子俘获是 β 衰变中的一种过程。

放射性原子核的衰变过程是自发进行的，但衰变过程遵循一定的统计规律。实验表明，对于同种放射性元素，它的每个原子核发生衰变的可能性是相同的，但不是同时发生衰变，在很短的时间间隔内，衰变的原子数与存在的原子数成正比。即在很短的时间 Δt 内如果有 ΔN 个原子核发生衰变，则它们满足下面的关系：

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

式中的负号表示衰变后原子核数减少。对此式积分，则得到放射性衰变规律，即

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-4)$$

式中 N_0 ——初始时刻 ($t=0$) 放射性物质未发生衰变的原子核的数量；

N —— t 时刻放射性物质尚未发生衰变的原子核的数量；

t ——经过的衰变时间；

λ ——衰变常数。

可见，原子核的减少服从指数衰减规律，即放射性衰变服从指数衰减规律。

衰变常数是表征原子核衰变快慢的物理量，其物理意义是单位时间内原子核发生衰变的概率。不同种类的原子核衰变常数不同，也就是说，它们衰变的速率不同。

实际应用中，经常采用半衰期描述放射性衰变的快慢。半衰期表示放射性原子核数目减少至原来数目一半时所需的时间，通常采用符号 $T_{1/2}$ 表示半衰期。按照半衰期的定义可以得到

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1-5)$$

放射性衰变是一个自发进行的过程，放射性元素的衰变方式和速率由原子核本身的性质决定，与原子核所处的物理状态或化学状态无关，外界条件（如温度、压力等）也不能改变它的衰变方式和速率。

图 1-7 是 Co-60、Cs-137 和 Tm-170 的衰变方式。从图中可见，Co-60 的衰变过程是，先经过一次 β 衰变，然后再经过两次 γ 衰变，变为稳定的 Ni-60。Cs-137 的衰变过程则有两种：一种是只经过一次 β 衰变就变为稳定的 Ba-137；另一种是先经过一次 β 衰变后再经过一次 γ 衰变变为稳定的 Ba-137。而 Tm-170 的衰变过程也

有两种：一种是只经过一次 β 衰变（76%）就变为稳定的 Yb-170；另一种是先经过一次 β 衰变（24%）后或者再经过一次 γ 衰变变为稳定的 Yb-170（或者再经过一次发射特征 X 射线变为稳定的 Yb-170）。

不同放射性元素的半衰期差别也很大，例如，放射性元素 Co-60 的半衰期为 5.3 年，而放射性元素 Ir-192 的半衰期仅为 74 天。这些都是它们固有的，不能通过某些方法、手段加以控制或改变。

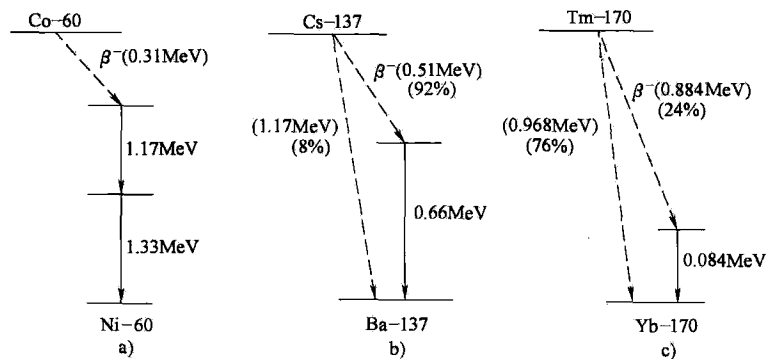


图 1-7 放射性衰变方式

从上面叙述的一些放射性同位素的衰变过程可以清楚看到，两个不同放射性同位素的源，即使活度相等，它们辐射的射线强度也并不一定相等。例如，同为 100Ci ($1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$) 的 Co-60 和 Tm-170 源，Co-60 源在一个核衰变中放出两个 γ 射线光子，而 Tm-170 源在一个核衰变中仅有 24% 的可能放出一个 γ 射线光子。

1.2 射线与物质的相互作用

当 X 射线、 γ 射线穿过物体时，将与物质发生复杂的相互作用。这些作用从本质上说是光子与原子、原子的电子、自由电子及原子核的相互作用。其中主要的作用是：光电效应、康普顿效应、电子对效应和瑞利散射。由于这些相互作用，一部分射线被物质吸收，一部分射线被散射，使穿透物体的射线强度减弱。

1.2.1 光电效应

射线在物质中传播时，入射光子与原子的轨道电子相互作用，把全部能量传递给这个轨道电子，获得能量的电子克服原子核的束缚成为自由电子，入射光子消失，这种作用过程称为光电效应。发生光电效应的条件是，入射光子的能量大于轨道电子与原子核的结合能。如果入射光子的能量小于轨道电子与原子核的结合能，不能发生光电效应。图 1-8 是光电效应的示意图。

在光电效应中，释放的自由电子称为光电子。光电子发射的方向与入射光子的

能量相关,当入射光子的能量较低时,光电子主要分布在与人射光子方向垂直的方向;随着入射光子能量的增大,光电子的发射方向逐渐倾向于入射光子的方向。图1-9是光电子上述分布特点的图示。

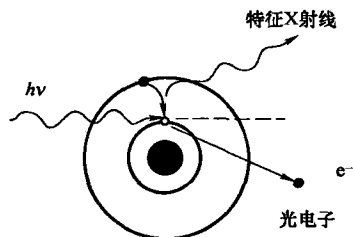


图 1-8 光电效应示意图

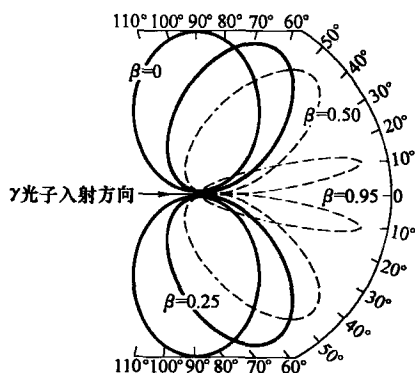


图 1-9 光电效应中光电子的分布

当发生光电效应时,在电子层中将产生空位,这将使原子处于不稳定的状态,因此外层电子将向存在空位的电子层跃迁,使原子回到稳定的状态。在跃迁过程中,将产生跃迁辐射,发射特征X射线。这种辐射通常称为荧光辐射。伴随发射特征X射线(荧光辐射)是光电效应的重要特征。

在较高能级的轨道电子填充空位时,可能发生的另一过程是俄歇效应,如图1-10所示。即较高能级的轨道电子填充空位时所释放的能量,可以激发外层轨道电子,使其成为自由电子,一般称为俄歇电子。对轻元素更容易发生俄歇效应。

光电效应主要发生在入射光子与原子内层轨道电子的相互作用过程中。光电效应的发生概率与元素原子序数的5次方成正比,当射线能量增大时,发生概率降低(约与光子能量的 $7/2$ 次方成反比)。对低原子序数物质,当光子能量超过100keV时光电效应可以忽略;对高原子序数物质,光子能量直到约2MeV时对射线吸收光电效应仍是最主要的作用。图1-11是光电效应与光子能量关系的示意图。

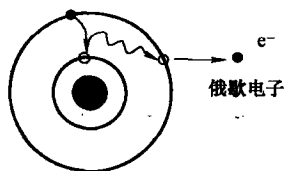


图 1-10 俄歇效应示意图

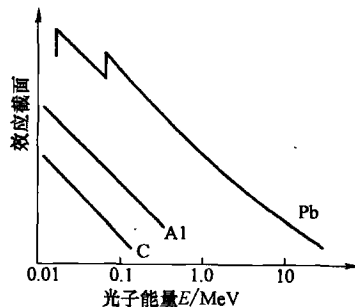


图 1-11 光电效应与光子能量的关系

低能光子与高原子序数物质发生相互作用时，光电效应具有重要意义。

1.2.2 康普顿效应

入射光子与受原子核束缚较小的外层轨道电子或自由电子发生的相互作用称为康普顿效应，也常称为康普顿散射。如图 1-12 所示，在这种相互作用过程中，入射光子与原子外层轨道电子碰撞之后，它的一部分能量传递给电子，使电子从原子的电子轨道飞出，这种电子称为反冲电子。同时，入射光子的能量减少，成为散射光子，并偏离了入射光子的传播方向。

当入射光子的能量很低并与自由电子相互作用时，入射光子的能量将不改变，而仅仅改变其方向，这个作用过程是非常次要的相互作用过程。

康普顿效应的发生概率与元素原子序数的 1 次方成正比，对主要射线能量范围，发生概率与射线能量成反比。对中等能量的光子，康普顿效应对各种元素都是主要的作用。图 1-13 是康普顿效应与光子能量关系的示意图。

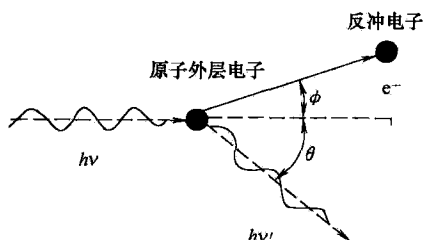


图 1-12 康普顿效应示意图

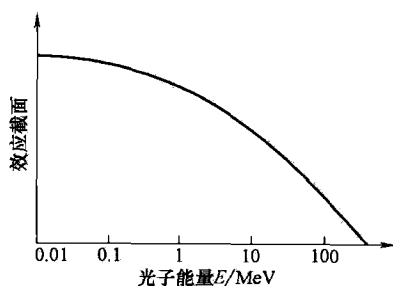


图 1-13 康普顿效应与光子能量的关系

在康普顿效应中，反冲电子和散射光子的方向都相关于入射光子的能量。随着入射光子能量的增加，反冲电子和散射光子的偏离角都减少，散射线波长将增长。图 1-14 显示了康普顿效应中散射线强度的空间分布与光子能量的关系。可见，对于低能入射光子，散射线强度在不同方向差别很小，但随着入射光子能量的增加，在入射光子方向的散射线强度将远大于背向散射线强度。

1.2.3 电子对效应

高能光子入射到物质中时，与物质的原子核发生相互作用，光子放出全部能量，转化为一对正、负电子，这就是电子对效应，如图 1-15 所示。在电子对效应中，入射光子消失，产生的正、负电子对在不同方向飞出，其方向与入射光子的能量相关。

电子对效应只能发生在入射光子的能量不小于 1.02MeV 时。这是因为电子的静止质量相当于 0.51MeV 能量，根据能量守恒定律，只有入射光子的能量不小于