

全国特种设备无损检测人员资格考核统编教材

射线检测

(第二版)

中国特种设备检验协会组织编写

主编 强天鹏

中国劳动社会保障出版社

《全国特种设备无损检测人员资格考核统编教材》

编审委员会名单

主 任 宋继红

副主任 林树青、王晓雷、沈 钢、强天鹏

委 员 郑世才、李 衍、顾阎如、姚志忠、宋志哲、
胡学知、李 伟、张 平、周志伟、邢兆辉、
郑 晖、张 明、阎建芳、解应龙、蒋仕良、
许遵言、袁 榕、侯少华、张志超、郭伟灿、
毛小虎、韩建荒、陈玉宝、邱 扬、高迎峰、
姚 力、夏福勇、张路根

目 录

第 1 章 射线检测的物理基础	(1)
1.1 原子与原子结构	(1)
1.1.1 元素与原子	(1)
1.1.2 核外电子运动规律	(2)
1.1.3 原子核结构	(4)
1.2 射线的种类和性质	(5)
1.2.1 X 射线和 γ 射线的性质	(5)
1.2.2 X 射线的产生及其特点	(6)
1.2.3 γ 射线的产生及其特点	(8)
1.2.4 波粒二象性	(9)
1.2.5 射线的种类	(10)
1.2.6 关于标识 X 射线的进一步讨论	(10)
1.2.7 工业检测常用放射性同位素的特性	(11)
1.3 射线与物质的相互作用	(14)
1.3.1 光电效应	(14)
1.3.2 康普顿效应	(15)
1.3.3 电子对效应	(16)
1.3.4 瑞利散射	(17)
1.3.5 各种相互作用发生的相对概率	(17)
1.3.6 窄束、单色射线的强度衰减规律	(18)
1.3.7 宽束、多色射线的强度衰减规律	(20)
1.3.8 连续 X 射线吸收 (衰减) 系数测试和吸收 (衰减) 曲线	(22)
1.3.9 截面与吸收系数	(24)
1.3.10 带电粒子与物质的相互作用	(25)
1.4 射线照相法的原理与特点	(25)
1.4.1 射线照相法的原理	(26)
1.4.2 射线照相法的特点	(27)
第 2 章 射线检测的设备和器材	(28)
2.1 X 射线机	(28)
2.1.1 X 射线机的种类和特点	(28)

2.1.2	X射线管	(30)
2.1.3	高压发生电路	(36)
2.1.4	X射线机的基本结构	(39)
2.1.5	X射线机的主要技术条件	(42)
2.1.6	X射线机的使用、维护和修理	(44)
2.2	γ 射线机	(46)
2.2.1	γ 射线源的主要特性参数	(46)
2.2.2	γ 射线探伤设备的特点	(47)
2.2.3	γ 射线探伤设备的分类与结构	(47)
2.2.4	γ 射线探伤机的操作	(50)
2.2.5	γ 射线探伤设备的维护及故障排除	(52)
2.3	射线照相胶片	(53)
2.3.1	射线照相胶片的构造与特点	(53)
2.3.2	感光原理及潜影的形成	(54)
2.3.3	底片黑度	(55)
2.3.4	射线胶片的特性	(55)
2.3.5	卤化银粒度对胶片性能的影响	(60)
2.3.6	胶片的光谱感光度	(60)
2.3.7	工业射线胶片系统的分类	(60)
2.3.8	颗粒度 σ_D 的测量	(61)
2.3.9	胶片的使用与保管	(62)
2.4	射线照相辅助设备器材	(62)
2.4.1	黑度计(光学密度计)	(62)
2.4.2	增感屏	(63)
2.4.3	像质计	(66)
2.4.4	其他照相辅助器材	(70)

第3章	射线照相质量的影响因素	(72)
3.1	射线照相灵敏度的影响因素	(72)
3.1.1	概述	(72)
3.1.2	射线照相对比度	(73)
3.1.3	射线照相清晰度	(75)
3.1.4	射线照相颗粒度	(79)
3.2	灵敏度和缺陷检出的有关研究	(80)
3.2.1	最小可见对比度 $\Delta D_{\min}$	(80)
3.2.2	射线底片黑度与灵敏度	(80)
3.2.3	缺陷检出试验	(82)
3.2.4	几何因素对小缺陷对比度的影响	(85)

3.2.5	不同缺陷的灵敏度关系公式	(90)
3.2.6	射线照相裂纹检出研究的总结	(93)
3.2.7	信噪比	(96)
第4章	射线透照工艺	(99)
4.1	透照工艺条件的选择	(99)
4.1.1	射线源和能量的选择	(99)
4.1.2	焦距的选择	(101)
4.1.3	曝光量的选择与修正	(104)
4.2	透照方式的选择和一次透照长度的计算	(107)
4.2.1	透照方式的选择	(107)
4.2.2	一次透照长度的计算	(109)
4.3	曝光曲线的制作及应用	(115)
4.3.1	曝光曲线的构成和使用条件	(116)
4.3.2	曝光曲线的制作	(117)
4.3.3	曝光曲线的使用	(118)
4.4	散射线的控制	(121)
4.4.1	散射线的来源和分类	(121)
4.4.2	散射比的影响因素	(121)
4.4.3	散射线的控制措施	(122)
4.5	焊缝透照常规工艺	(124)
4.5.1	透照工艺的分类和内容	(124)
4.5.2	焊缝透照专用工艺卡示例	(125)
4.5.3	焊缝透照的基本操作	(128)
4.6	射线透照技术和工艺研究	(129)
4.6.1	大厚度比试件的透照技术	(129)
4.6.2	安放式接管管座焊缝的射线照相技术要点	(131)
4.6.3	管子—管板角接焊缝的射线照相技术要点	(131)
4.6.4	小径管的透照技术与工艺	(132)
4.6.5	球罐 γ 射线全景曝光工艺	(136)
第5章	暗室处理技术	(141)
5.1	暗室基本知识	(141)
5.1.1	暗室布置知识	(141)
5.1.2	暗室设备器材使用知识	(142)
5.1.3	配液注意事项	(142)
5.1.4	胶片处理程序和操作要点	(143)
5.1.5	胶片处理的药液配方	(143)

5.1.6	控制使用单位的胶片处理条件的方法	(145)
5.2	暗室处理技术	(145)
5.2.1	显影	(145)
5.2.2	停显	(149)
5.2.3	定影	(149)
5.2.4	水洗和干燥	(151)
5.3	自动洗片机	(151)
第 6 章	射线照相底片的评定	(154)
6.1	评片工作的基本要求	(154)
6.1.1	底片质量要求	(154)
6.1.2	环境设备条件要求	(156)
6.1.3	人员条件要求	(157)
6.1.4	与评片基本要求相关的知识	(157)
6.2	评片基本知识	(159)
6.2.1	观片的基本操作	(159)
6.2.2	投影的基本概念	(159)
6.2.3	焊接的基本知识	(161)
6.2.4	焊接缺陷的危害性及分类	(164)
6.3	底片影像分析	(168)
6.3.1	焊接缺陷影像	(169)
6.3.2	常见伪缺陷影像及识别方法	(170)
6.3.3	表面几何影像的识别	(171)
6.3.4	底片影像分析要点	(171)
6.4	焊接接头的质量等级评定	(173)
6.4.1	焊接接头质量分级规定评说	(174)
6.4.2	射线照相检验的记录与报告	(174)
第 7 章	辐射防护	(176)
7.1	辐射量的定义、单位与标准	(176)
7.1.1	描述电离辐射的常用辐射量和单位	(176)
7.1.2	描述辐射防护的常用辐射量和单位	(180)
7.2	剂量测定方法和仪器	(184)
7.2.1	辐射监测的内容及分类	(184)
7.2.2	剂量测定仪器的工作原理	(185)
7.2.3	剂量仪器的选择及其校准	(186)
7.2.4	场所辐射监测仪器	(187)
7.2.5	个人剂量监测仪器	(188)

7.3	辐射防护的原则、标准和辐射损伤机理	(189)
7.3.1	辐射防护的目的和基本原则	(189)
7.3.2	剂量限值规定	(190)
7.3.3	辐射损伤的机理	(191)
7.4	辐射防护的基本方法和防护计算	(193)
7.4.1	辐射防护的基本方法	(193)
7.4.2	照射量的计算	(194)
7.4.3	防护计算	(195)
7.4.4	屏蔽防护常用材料	(199)
第8章	其他射线检测方法和技术	(201)
8.1	高能射线照相	(201)
8.1.1	电子回旋加速器和电子直线加速器	(201)
8.1.2	高能射线照相的特点	(202)
8.1.3	高能射线照相的几个技术数据	(203)
8.1.4	直线加速器的结构、原理及操作	(204)
8.1.5	高能射线的辐射防护	(206)
8.2	射线实时成像检测技术	(206)
8.2.1	射线实时成像检测系统的进展	(207)
8.2.2	射线实时成像检测系统的图像特性	(208)
8.2.3	射线实时成像检测技术的工艺要点	(209)
8.2.4	图像增强器射线实时成像系统的优点和局限性	(211)
8.3	数字化射线成像技术	(211)
8.3.1	计算机射线照相技术 (CR)	(211)
8.3.2	线阵列扫描成像技术 (LDA)	(212)
8.3.3	数字平板直接成像技术 (DR)	(215)
8.3.4	关于数字化射线成像技术的进一步知识	(217)
8.4	X射线层析照相 (X-CT)	(223)
8.5	中子射线照相	(224)
8.5.1	中子射线照相的原理	(224)
8.5.2	中子射线照相设备	(226)
8.5.3	中子射线照相应用简介	(228)
第9章	射线检测的质量管理	(229)
9.1	全面质量管理	(229)
9.2	射线检测人员的管理	(229)
9.2.1	人力资源配备和储备	(229)
9.2.2	人员资格管理	(230)

9.2.3	人员培训与考核	(230)
9.2.4	人员技术业绩档案	(230)
9.3	射线检测设备及器材的管理	(231)
9.3.1	仪器设备材料采购管理	(231)
9.3.2	仪器设备档案	(231)
9.3.3	仪器设备使用管理	(232)
9.3.4	仪器设备的检定校准	(233)
9.3.5	消耗材料的管理	(233)
9.4	射线检测工艺的管理	(233)
9.4.1	工艺规程的制定	(234)
9.4.2	检测工艺卡	(234)
9.4.3	工艺纪律的监督与管理	(235)
9.4.4	新技术、新工艺的鉴定	(235)
9.4.5	例外检测专用工艺的制定	(235)
9.5	射线检测报告、底片及原始记录控制和档案管理	(236)
9.6	射线检测环境的管理	(236)
9.7	放射防护安全管理	(237)
9.7.1	放射防护法规与标准	(237)
9.7.2	放射防护管理责任部门	(237)
9.7.3	射线装置申请许可制度	(238)
9.7.4	放射防护培训	(238)
9.7.5	放射工作人员证的管理	(239)
9.7.6	放射工作人员证的健康管理	(239)
9.7.7	放射事故管理	(240)
附录 I	JB/T 4730 标准中的确定焦距的最小值的诺模图	(241)
附录 II	JB/T 4730 标准中的环向对接焊接接头的透照次数图	(243)
附录 III	JB/T 4730 标准规定的像质计灵敏度值	(249)
附录 IV	国内外射线照相检测的部分标准目录	(251)
主要参考文献		(255)

第1章 射线检测的物理基础

1.1 原子与原子结构

1.1.1 元素与原子

世界上一切物质都是由元素构成的。迄今为止，已发现的元素有 100 多种，其中天然存在的有 90 多种，人工制造的有 10 多种。

为了便于表达和书写，每种元素都用一定的符号来表示，这种符号被称作元素符号。元素符号通常采用该元素拉丁文名称第一个字母的大写，或再附加一个小写字母。例如，碳的元素符号是 C，钴的元素符号是 Co，铁的元素符号是 Fe 等。

原子是元素的具体存在，是体现元素性质的最小微粒。在化学反应中，原子的种类和性质不会发生变化。

原子的质量极其微小，如氢原子的质量为 1.673×10^{-24} g，以常用质量单位来表示很不方便，因此，物理学中采用“原子质量单位”，用符号“u”表示，即规定碳同位素 $^{12}_6\text{C}$ 原子质量的 $1/12$ 为 1 u，而原子量就是某元素的原子的平均质量相对于 $^{12}_6\text{C}$ 的的质量的 $1/12$ 的比值。照此规定，氢元素的原子量为 1，氧元素的原子量为 16。

原子是由一个原子核和若干个核外电子组成的。原子核带正电荷，位于原子中心，核外电子带负电荷，绕原子核做高速运动。原子核所带的正电荷与核外电子所带的负电荷相等，所以整个原子对外呈电中性。

电子的质量极轻，为 9.109×10^{-28} g，等于氢原子质量的 $1/1837$ 。电子带有 1 个单位负电荷 (1.602×10^{-19} C)。

在原子中，原子核所带的正电荷数（简称核电荷数）与核外电子所带的负电荷数相等，所以核外电子数就等于核电荷数。不同元素的核电荷数不同，核外电子数也不同。在元素周期表中，元素的次序就是按核电荷数排列的，因此，周期表中的原子序数 Z 等于核电荷数。

原子核仍然可以再分，实验证明，原子核是由两种更小的粒子（即质子和中子）组成的。中子不带电，质子带 1 个单位正电荷。原子核中有几个质子，就有几个核电荷，因此在数值上有以下关系：

$$\text{质子数} = \text{核电荷数} = \text{核外电子数} = \text{原子序数}$$

质子的质量为 1.6726×10^{-24} g，中子的质量为 1.6749×10^{-24} g，两者的质量几乎相等。用原子质量单位来度量，质子的质量为 1.007 277 u，中子的质量为 1.008 65 u，都接

近于 1，而电子太轻，计算原子量时可以忽略不计，由此得以下关系：

$$\text{相对原子质量} = \text{质子数} + \text{中子数}$$

$$\text{中子数} = \text{相对原子质量} - \text{质子数} = \text{相对原子质量} - \text{原子序数 } Z$$

凡是具有一定质子数、中子数并处于特定能量状态的原子或原子核称为核素。核素标准的书写方法是将核子数（质量数）表示在元素符号的左上标位置，核电荷数标于左下角，例如 ${}_{27}^{60}\text{Co}$ ，即表示核素钴质量数为 60，其核电荷数为 27，核内有 27 个质子，而中子数为 $60 - 27 = 33$ 。在工程应用时可直接书写元素符号和质量数来表示某一核素，例如写为：钴 60 或 $\text{Co}60$ 。

目前已知的核素有 2 000 多种，分别属于 100 多种元素，一种元素可包含有多种核素。同一种元素的原子必定具有相同的核电荷数，即核内的质子数相同，但核内的中子数却可以不同。例如，氢元素有三种原子： ${}^1_1\text{H}$ （氕）； ${}^2_1\text{H}$ （氘）； ${}^3_1\text{H}$ （氚），它们均含有 1 个电子，1 个质子，但中子数分别为 0、1、2，原子量分别为 1、2、3。又例如 ${}_{27}^{60}\text{Co}$ 和 ${}_{27}^{59}\text{Co}$ ，它们是钴元素的两种原子，分别含有 27 个质子、33 个中子和 27 个质子、32 个中子。这些质子数相同而中子数不同（或核电荷数相同而相对原子质量不同）的各种原子互为同位素。

核素可分为稳定和不安定的两类，不安定的核素又称放射性核素，它能自发地放出某些射线—— α 、 β 或 γ 射线，而变为另一种元素。

放射性核素又可分为天然的和人工制造的两类，前者为自然界存在的矿物，一般 $Z \geq 83$ 的许多元素及其化合物具有放射性；获得后者最常用的方法是用高能粒子轰击稳定核素的核，使其变成放射性核素。符合射线检测需要的天然放射性核素稀少，又不易提炼，价格昂贵，所以当前射线检测所用的均为人工放射性核素。

1.1.2 核外电子运动规律

19 世纪初，美国科学家道尔顿提出了原子理论，他认为原子是物质存在的最小单元，是不可分割的。

1897 年，英国科学家汤姆逊发现了电子，从而否定了原子不可分割的说法。1903 年汤姆逊提出一种原子模型，认为正电荷平均分布在整个原子的球形体积中，而电子则平均分布在这些正电荷之间。然而，这种原子模型被卢瑟福的 α 粒子散射实验否定了。

1911 年，英国科学家卢瑟福提出了原子有核模型，认为原子像一个缩小的太阳系，中心有一个几乎占有全部质量且带正电的原子核，核外有若干个带负电的电子绕核运转，如同行星围绕太阳运转一样。这种原子模型得到了人们的公认，但它与古典电磁理论有矛盾，对原子的线状光谱也无法解释，因而存在很多缺陷。

1913 年，丹麦科学家玻尔运用量子论思想对原子有核模型做了进一步的发展和完善，提出了原子轨道和能级的概念，并对原子发光机理做出了解释。玻尔的原子理论假设可概括叙述如下：

原子中的电子沿着圆形轨道绕核运行，各条轨道有不同的能量状态，叫做能级，各能级的能值都是确定的。正常情况下电子总是在能级最低的轨道上运行，这时的原子状态称作基态。

当原子从外界吸收一定能量时，电子就由最低能级跳到较高能级，这一过程称作跃迁，

这时原子的状态称作激发态。激发态是一种不稳定状态，所以电子将再次跃迁回较低能级，这样，先后两个能级的能值差就会以光能的形式辐射出来，即：

$$h\nu = E'' - E' \quad (1-1)$$

式中 $h\nu$ ——光子能量；

E'' ——较高能级的能值；

E' ——较低能级的能值。

以氢原子为例：氢原子的能级图如图 1—1 所示，图中各定态轨道的量子化的能量状态即能级，用主量子数 n 表示。能量单位用电子伏（符号 eV，1 电子伏相当于 1 个电子通过电势差为 1 伏的电场时所获得或减少的能量）。图中最下一条横线是 $n=1$ ，是离核最近且能量最低的能级，表示氢原子处于基态，如果由外界获得 10.2 eV（即 $E_2 - E_1$ ）的能量，原子的内能增大，原子中的一个电子就跳到 $n=2$ 的第二个能级，再获得 1.89 eV（即 $E_3 - E_2$ ）的能量，电子就跳到 $n=3$ 的第三个能级，在后两种情况下，氢原子都处于激发态。基态的氢原子获得 13.6 eV 的能量，电子就能完全脱离核的引力，成为自由电子（即 $E=0$ ）。受激的电子是不稳定的，它不能在高能级停留太久，接着就跳回较低能级。电子从高能级跃迁到低能级时，内能降低，释放出 1 个光子，如果电子是从第三能级跳到第一能级，则放出的光子应具有 12.09 eV（即 $E_3 - E_1$ ）的能量。

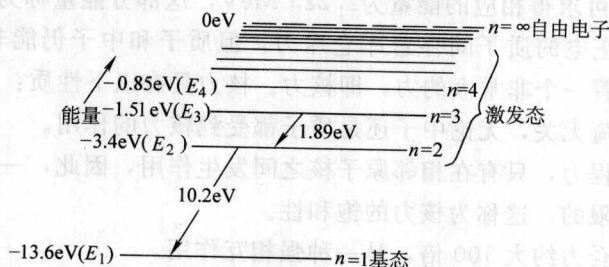


图 1—1 氢原子的能级图

现代科学用量子力学研究微观粒子。从量子力学的观点看，玻尔原子理论也存在缺陷。实际上，核外电子并不在固定的轨道上运行，所谓原子轨道只是在三维空间中找到该运动电子的某个区域。由于核外电子任一时刻的位置和动量无法同时准确测出，描述核外电子的运动只能采用统计的方法。把电子在空间出现的概率密度分布用图像表示出来，称作电子云。描述原子轨道和电子云的参数共有三个，即：

1. 主量子数 n 。用于确定原子的电子层和轨道能级（各电子层分别用 K、L、M、N... 表示）。
2. 角量子数 l 。用于确定每个电子层所包含的分层，同时还代表了电子的角动量和原子轨道形状（各分层分别用 s、p、d、f... 表示）。
3. 磁量子数 m 。用于确定原子轨道在空间的伸展方向。此外，还有一个用于确定电子的自旋方向的自旋量子数 m_s 。

原子的电子层结构，特别是最外层结构，对元素的化学性质有很大影响。根据元素周期性变化的规律，按元素原子核电荷数递增顺序把元素排列起来，并使具有相同电子层的元素排在同一横行，化学性质相似的各元素处在同一纵行里，就构成了元素周期表。元素周期表是元素周期律的具体表现形式，反映了元素间性质相互联系及其对原子结构的依赖关系。

1.1.3 原子核结构

原子核的半径为 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ cm, 约为原子半径的万分之一。如果把原子设想成一个直径为 10 m 的球体, 那么原子核也只有芝麻那么大, 所以说原子内部的绝大部分是空的。

原子核虽小, 却占有原子的 99% 以上的质量。通过散射实验可以测定核的近似半径, 实验表明核的半径 r 与原子质量数 A 的 $1/3$ 次方成正比。这说明无论哪一种元素, 其核的密度是相同的。

正如原子中的电子处于运动中一样, 核中的粒子, 即质子和中子也处于运动中, 因而核具有角动量和磁矩。光谱分析表明, 核的角动量和磁矩也是量子化的。

原子核的总质量总是小于它的组成部分的质量和, 这是因为其中的一部分质量用于转变成原子核的结合能。即把原子核中粒子结合在一起的吸引力有关的负电位能的质量当量。例如, 氢同位素氘的核由 1 个质子和 1 个中子组成, 已知两者质量之和为 $m_p + m_n = 2.015\ 942\ \text{u}$, 而氘核的实际质量 $m_d = 2.013\ 552\ \text{u}$, 质量差值 $m_p + m_n - m_d = 0.002\ 390\ \text{u}$, 由质能公式 $E = m_0 c^2$ 可求得相应的能量为 2.225 MeV, 这部分能量称为结合能。

在原子核内, 带正电的质子间存着库仑斥力, 但质子和中子仍能非常紧密地结合在一起, 这说明核内存在着一个非常大的力, 即核力。核力具有以下性质:

第一, 核力与电荷无关, 无论中子还是质子都受到核力的作用。

第二, 核力是短程力, 只有在相邻原子核之间发生作用, 因此, 一个核子所能相互作用的其他核子数目是有限的, 这称为核力的饱和性。

第三, 核力比库仑力约大 100 倍, 是一种强相互作用。

第四, 核力能促成粒子的成对结合 (例如, 两个自旋相反的质子或中子) 以及对对结合 (即总自旋为零的一对质子和一对中子的结合)。

根据以上核力的性质以及核力与库仑力之间的竞争, 可以定性了解原子核的稳定性。由于核力促成原子核成对结合和对对结合, 如果不考虑库仑力, 最稳定的应是中子数和质子数相等的那些核, 考虑库仑斥力后, 则应是包含更多中子的核更稳定。但中子数过多的核又是不稳定的, 因为没有足够的质子来与中子配对; 质子过多的核也是不稳定的, 因为库仑斥力将随之增大。核稳定性与中子数、质子数的关系为: 对小质量数的核, $N/Z = 1$ 附近较稳定, 这个比值随核质量数的增大而增加; 对大质量数的核, $N/Z = 1.6$ 附近的核较稳定。

采用人为的方法, 以中子、质子或其他基本粒子作为炮弹轰击原子核, 从而改变核内质子或中子的数目, 便可以制造出新的核素, 也可以使稳定的核素变为不稳定的核素。

现已发现的约 2 000 种核素中, 天然存在的有 300 多种, 其中有 30 多种是不稳定的; 人工制造的有 1 600 多种, 其中绝大部分是不稳定的。不稳定的核素会自发蜕变, 变成另一种核素, 同时放出各种射线, 这种现象称为放射性衰变。

放射性衰变有多种模式, 其中最主要的有:

1. α 衰变 放出带 2 个正电荷的氦核, 衰变后形成的子核, 核电荷数较母核减 2, 即在周期表上前移两位, 而质量数较母核减少 4。

2. β 衰变 包括 β^- 衰变、 β^+ 衰变和轨道电子俘获，其中：

β^- 衰变：母核放出电子，衰变后子核的质量数不变，而核电荷数增加 1，即在周期表上后移一位。

轨道电子俘获：母核俘获核外轨道上的一个电子（最常见的是俘获 K 层电子，称为 K 俘获），核中的一个质子转为中子，即子核在周期表上前移一位。

3. γ 衰变 放出波长很短的电磁辐射。衰变前后核的质量数和电荷数均不发生改变。

γ 衰变总是伴随着 α 衰变或 β 衰变而发生，母核经 α 衰变或 β 衰变到子核的激发态。这种激发态核是不稳定的，它要通过 γ 衰变过渡到正常态。所以 γ 射线是原子核由高能级跃迁到低能级而产生的。

1.2 射线的种类和性质

1.2.1 X 射线和 γ 射线的性质

X 射线和 γ 射线与无线电波、红外线、可见光、紫外线等属于同一范畴，都是电磁波，其区别只是在于波长不同以及产生方法不同，因此，X 射线和 γ 射线具有电磁波的共性，同时也具有不同于可见光和无线电波等其他电磁辐射的特性。

从图 1—2 所示的电磁波谱中可以看到各种电磁辐射所占据的波长范围。

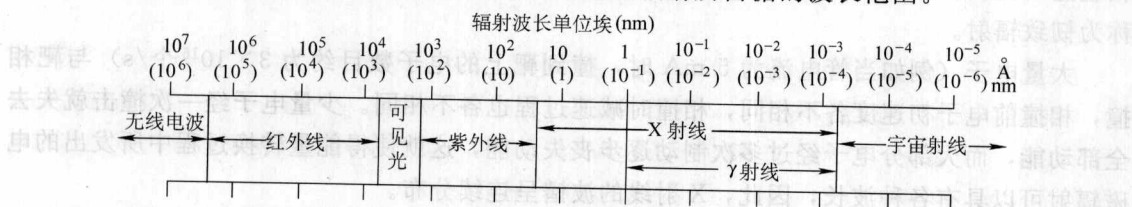


图 1—2 电磁波谱

电磁波的波长 λ 和频率 ν 以及波速（光速） c 的关系式为：

$$\lambda = c/\nu \quad (1-2)$$

X 射线和 γ 射线具有以下性质：

1. 在真空中以光速直线传播。
2. 本身不带电，不受电场和磁场的影响。
3. 在媒质界面上只能发生漫反射，而不能像可见光那样产生镜面反射；X 射线和 γ 射线的折射系数非常接近于 1，所以折射的方向改变不明显。
4. 可以发生干涉和衍射现象，但只能在非常小的，例如，晶体组成的光栅中才能发生这种现象。
5. 不可见，能够穿透可见光不能穿透的物质。
6. 在穿透物质过程中，会与物质发生复杂的物理和化学作用，例如，电离作用、荧光作用、热作用以及光化学作用。
7. 具有辐射生物效应，能够杀伤生物细胞，破坏生物组织。

1.2.2 X射线的产生及其特点

X射线是在X射线管中产生的，X射线管是一个具有阴阳两极的真空管，阴极是钨丝，阳极是金属制成的靶。在阴阳两极之间加有很高的直流电压（管电压），当阴极加热到白炽状态时释放出大量电子，这些电子在高压电场中被加速，从阴极飞向阳极（管电流），最终以很大速度撞击在金属靶上，失去所具有的动能，这些动能绝大部分转换为热能，仅有极少一部分转换为X射线向四周辐射。

对X射线管发出的X射线做光谱测定，可以发现X射线谱由两部分组成，一个是波长连续变化的部分，称为连续谱，它的最短波长只与外加电压有关，另一部分是具有分立波长的谱线，这部分谱线要么不出现，一旦出现它的谱峰所对应的波长位置完全取决于靶材料本身，这部分谱线称为标识谱，又称特征谱，标识谱重叠在连续谱之上，如同山丘上的宝塔（见图1—3）。

1. 连续谱的产生和特点

经典电动力学指出，带电粒子在加速或减速时必然伴随着电磁辐射，当带电粒子与原子相碰撞（更确切地说是与原子核的库仑场相互作用）发生骤然减速时，由此伴随产生的辐射称为韧致辐射。

大量电子（例如当管电流为5 mA时，撞到靶上的电子数目约为 3×10^{16} 个/s）与靶相撞，相撞前电子初速度各不相同，相撞时减速过程也各不相同。少量电子经一次撞击就失去全部动能，而大部分电子经过多次制动逐步丧失动能，这就使得能量转换过程中所发出的电磁辐射可以具有各种波长，因此，X射线的波谱呈连续分布。

连续谱存在着一个最短波长 $\lambda_{\min}$ ，其数值只依赖于外加电压 V 而与靶材料无关，如果一个电子在电场中得到动能 $E=eV$ ，与靶一次撞击这些动能全部转换为辐射能，则辐射的波长可按式计算：

$$E=eV=h\nu=hc/\lambda_{\min} \quad (1-3)$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} = \frac{12.4 \times 10^{-7}}{V} = \frac{12.4}{V} \text{ (Å)} \quad (1-4)$$

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

c ——光速， $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ；

e ——电子电量， $e=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ；

V ——管电压，kV。

连续谱中最大强度对应的波长 λ_{IM} 与最短波长 $\lambda_{\min}$ 的关系大致为：

$$\lambda_{\text{IM}} = 1.5 \lambda_{\min}$$

在实际检测中，以最大强度波长 λ_{IM} 为中心的邻近波段的射线起主要作用。

连续X射线的总强度 I_T 可用连续谱曲线下所包含的面积表示，即：

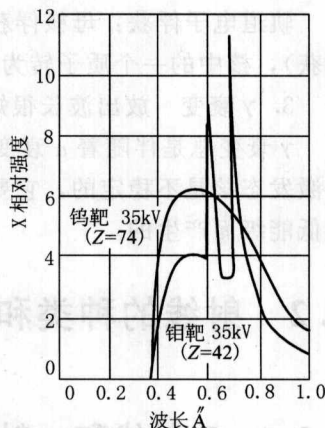


图1—3 X射线谱

$$I_T = \int_{\lambda_{\min}}^{\infty} I(\lambda) d\lambda \quad (1-5)$$

实验证明, I_T 与管电流 i (mA)、管电压 V (kV)、靶材料原子序数 Z 有以下关系:

$$I_T = K_i Z i V^2 \quad (1-6)$$

式中 K_i ——比例常数, $K_i \approx (1.1 \sim 1.4) \times 10^{-6}$ 。

管电流越大, 表明单位时间撞击靶的电子数越多, 产生的射线强度也越大; 管电压增加时, 虽然电子数目未变, 但每个电子所获得的能量增大, 因而短波成分射线增加, 且碰撞发生的能量转换过程增加, 因此, 射线强度同时增加; 靶材料的原子序数越高, 核库仑场越强, 韧致辐射作用越强, 射线强度也会增加, 所以靶一般采用高原子序数的钨制作。上述关系如图 1—3 和图 1—4 所示。

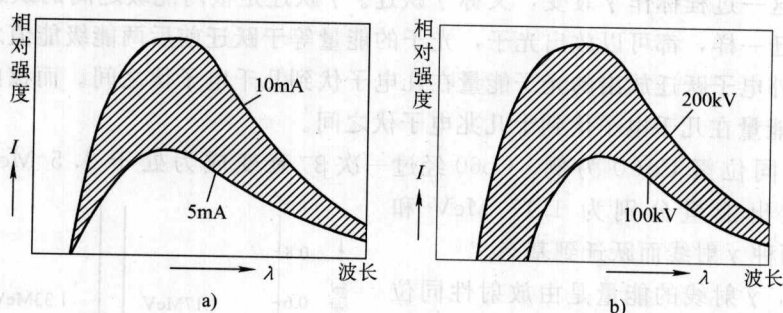


图 1—4 X 射线谱

a) 不同管电流 b) 不同管电压

X 射线的产生效率 η 等于连续射线的总强度 I_T 与管电压 V 和管电流 i 的乘积之比, 即:

$$\eta = \frac{I_T}{Vi} = \frac{K_i i Z V^2}{Vi} = K_i Z V \quad (1-7)$$

可见, X 射线的产生效率与管电压和靶材料原子序数成正比。在其他条件相同的情况下, 管电压越高, X 射线产生效率越高; 管电压的高压波形越接近恒压, X 射线产生效率也越高。当电压为 100 kV 时, X 射线的转换效率约为 1%, 而产生 4 MeV 高能 X 射线的加速器, 其转换效率约为 36%。

由于输入能量的绝大部分转换为热能, 所以 X 射线管必须有良好的冷却装置, 以保证阳极不会被烧坏。

2. 标识谱的产生和特点

当 X 射线管两端所加的电压超过某个临界值 V_k 时, 波谱曲线上除连续谱外, 还将在特定波长位置出现强度很大的线状谱线, 这种线状谱的波长只依赖于阳极靶面的材料, 而与管电压和管电流无关, 因此, 把这种标识靶材料特征的波谱称为标识谱, V_k 称为激发电压。不同靶材的激发电压各不相同, 如图 1—3 所示, 管电压 35 kV 时, 低于钨的激发电压 ($V_k = 69.51$ kV), 高于钼的激发电压 ($V_k = 20.0$ kV), 所以, 钼靶的波谱上有标识谱而钨靶的波谱上没有标识谱。

标识谱的产生机理是: 如果 X 射线管的管电压超过 V_k , 阴极发射的电子可以获得足够的能量, 它与阳极靶相撞时, 可以把靶原子的内层电子逐出壳层之外, 使该原子处于激发态。此时外层电子将向内层跃迁, 同时放出 1 个光子, 光子的能量等于发生跃迁的两能级能

值之差。 K_{α} 标志射线是 L 层电子跃迁至 K 层放出的, K_{β} 标志射线则是 N 层电子跃迁至 K 层放出的……L、M 等各壳层也可发生标志辐射, 但其能量小, 通常被 X 射线管壁吸收, 所以 X 射线波谱中最常见的是 K 系标识谱。

标志 X 射线强度只占 X 射线总强度的极少一部分, 能量也很低, 所以在工业射线检测中, 标识谱不起作用。

1.2.3 γ 射线的产生及其特点

γ 射线是放射性同位素经过 α 衰变或 β 衰变后, 在激发态向稳定态过渡的过程中从原子核内发出的, 这一过程称作 γ 衰变, 又称 γ 跃迁。 γ 跃迁是核内能级之间的跃迁, 与原子的核外电子的跃迁一样, 都可以放出光子, 光子的能量等于跃迁前后两能级能值之差。不同的是, 原子的核外电子跃迁放出的光子能量在几电子伏到几千电子伏之间。而核内能级的跃迁放出的 γ 光子能量在几千电子伏到十几兆电子伏之间。

以放射性同位素 $\text{Co}60$ 为例, $\text{Co}60$ 经过一次 β^- 衰变成为处于 2.5 MeV 激发态的 $\text{Ni}60$, 随后放出能量分别为 1.17 MeV 和 1.33 MeV 的两种 γ 射线而跃迁到基态。

由此可见, γ 射线的能量是由放射性同位素的种类所决定的。一种放射性同位素可能放出许多种能量的 γ 射线, 对此取其所辐射出的所有能量的平均值作为该同位素的辐射能量。例如: $\text{Co}60$ 的平均能为 $(1.17 + 1.33)/2 = 1.25$ MeV。

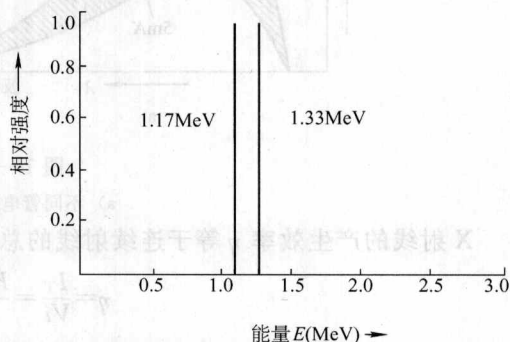


图 1—5 $\text{Co}60$ 的 γ 射线的线状能谱

γ 射线的能谱为线状谱, 谱线只出现在特定波长的若干点上, 如图 1—5 所示。

放射性同位素的原子核衰变是自发进行的, 对于任意一个放射性核, 它何时衰变具有偶然性, 不可预测, 但对于足够多的放射性核的集合, 它的衰变规律服从统计规律, 是十分确定的。

设在 dt 时间内发生的核衰变数目为 $-dN$, 它必定正比于当时存在的原子核数 N , 也显然正比于时间 dt , 即:

$$-dN = \lambda N dt \quad (1-8)$$

式中 λ 是比例系数, 称作衰变常数, dN 代表 N 的减小量, 所以前面要加负号, 设 $t=0$ 时原子核的数目为 N_0 , 则式 (1—8) 积分后得:

$$N = N_0 e^{-\lambda T} \quad (1-9)$$

即放射性同位素的衰变服从指数规律。

衰变常数 λ 反映了放射性物质的固有属性, λ 值越大, 说明该物质越不稳定, 衰变得越快。

放射性同位素衰变掉原有核数一半所需时间, 称为半衰期, 用 $T_{1/2}$ 表示。当 $T = T_{1/2}$ 时, $N = N_0/2$, 由式 (1—9) 可得:

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1-10)$$

$T_{1/2}$ 也反映了放射性物质的固有属性, λ 越大, $T_{1/2}$ 越小。

【例】 已知 Co60 放射性同位素的半衰期为 5.3 年, 其衰变常数是多少? 8 年后其放射强度衰变到初始强度的百分之几?

解: 由式 (1-10) $T_{1/2} = 0.693/\lambda$

得: $\lambda = 0.693/T_{1/2} = 0.693/5.3 = 0.131/\text{年}$

由式 (1-9) $N = N_0 e^{-\lambda T}$

得: $N/N_0 e^{-0.131 \times 8} = 0.35$

答: Co60 的衰变常数为 0.131/年。

8 年后其放射强度衰变到初始强度的 35%。

1.2.4 波粒二象性

微观粒子, 即光子、电子、中子、质子以及所有基本粒子, 在运动中既表现出波动性, 又表现出粒子性, 这个性质称为微观粒子的波粒二象性。

光的粒子性表现在光具有量子化的能量, 同时还具有动量, 光的动量是光子的运动质量和速度的乘积。光的波动性表现在光具有波长和频率, 当光通过狭缝时, 会产生衍射现象。

描述光子能量 E 和动量 P 的公式分别为

$$E = h\nu \quad (1-11)$$

$$P = h/\lambda \quad (1-12)$$

式中 h ——普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{Hz}^{-1}$;

ν ——频率, Hz;

λ ——波长, m。

以上两式中, 等式左边是光的粒子性, 等式右边是光的波动性, 通过普朗克常数两者被定量联系起来。

在以后的章节中, 叙述射线的光子能量、光电效应、康普顿效应、电子对效应是从粒子性角度讨论的, 而叙述射线的波长、频率、相干散射等是从波动性角度讨论的。

德布罗意在光的波粒二象性的启发下, 提出了一切实物粒子在运动中都具有波粒二象性的假设, 当质量为 m 的粒子, 以速度 v 匀速运动时, 其能量 E , 动量 P , 波长 λ 和频率 ν 的相应关系为:

$$E = h\nu = mc^2 \quad (1-13)$$

$$P = h/\lambda = mv \quad (1-14)$$

德布罗意假设在电子衍射实验中得到证实, 按上式可计算出 10 keV 的电子波长约为 $0.12 \text{ \AA}$ 。

实物粒子的波称作物质波, 与光子对应的电磁波是有差别的, 例如, 光在真空中的速度只有一个, 即光速, 而电子或中子可以具有任何小于光速的速度。在质量方面, 光子静止质量为零, 而电子和中子均有质量。在与物质相互作用的过程中, 光子和实物粒子的表现也存