

无损检测技术应用丛书

宋天民 主编

射线检测

SHEXIAN JIANCE

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

无损检测技术应用丛书

射线检测

宋天民 主编

中国石化出版社

内 容 简 介

本书是“无损检测技术应用丛书”之一。本书系统介绍了射线检测的设备、工艺、评片、防护和在石油化工设备检测中的应用。本书的特点是：设计了一个系统性强的章节安排；融入了较多的应用内容；特别突出介绍了在石油化工设备中的应用；介绍了射线检测理论和技术的新观点和新成果。

本书可作为石油化工企业射线检测人员系统培训用书，也可作为无损检测专业及相关专业的参考教材，还可供无损检测工程技术人员、安全防护管理人员和广大无损检测工作者阅读参考。

图书在版编目（CIP）数据

射线检测 / 宋天民主编. —北京：中国石化出版社，2011.3
(无损检测技术应用丛书)
ISBN 978-7-5114-0706-1

I. ①射… II. ①宋… III. ①射线检验 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 018896 号

未经本社书面授权，本书任何部分不得被复制、抄袭，或者以任何形式或任何方式传播。版权所有，侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址：北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编：100011 电话：(010)84271850

读者服务部电话：(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 355 千字

2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷

定价：35.00 元

前 言

射线检测是无损检测技术之一。随着现代工业和科学技术的发展,射线检测技术在设备的运行、产品质量的保证、生产效率的提高和生产成本的降低等领域正发挥着越来越大的作用。

本书为“无损检测技术应用丛书”之一,全书共分7章:第1章射线检测物理基础;第2章射线检测设备;第3章射线检测工艺;第4章其他射线检测技术;第5章焊缝射线检测;第6章射线检测的评片;第7章射线检测防护。本书编写的特点是:

1. 设计了一个系统性强的章节安排;
2. 突出了应用的内容,重点介绍了射线检测技术在石油化工设备中的应用;
3. 增加了射线检测理论和技术的新观点和新成果。

本书在编写过程中,既注重理论和实际的结合,更注重射线检测技术在石油化工设备中的应用;既系统介绍了射线检测的设备、工艺、评片和防护,又介绍了射线检测理论和技术的新观点和新成果。

随着射线检测技术的发展,国内外的一些重要射线检测标准作了修订,本书尽量引用新标准,读者在阅读本书过程中,应使用标准的最新版本。

本书由辽宁石油化工大学编写,宋天民、张国福、苏辉、管建军、王国庆、闫萍、孔祥军、杨坪等参加了本书的编写,全书由宋天民主编。

限于编者的水平有限,书中肯定存在不足和错误,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 射线检测物理基础	(1)
1.1 原子结构	(1)
1.1.1 原子的核模型	(1)
1.1.2 玻尔的氢原子理论	(1)
1.1.3 原子的壳层结构	(3)
1.1.4 基本粒子	(3)
1.1.5 波粒二象性	(6)
1.2 检测射线的种类和性质	(6)
1.2.1 X射线和 γ 射线的性质	(6)
1.2.2 X射线的产生及其特点	(7)
1.2.3 γ 射线的产生及其特点	(9)
1.3 射线与物质的相互作用	(11)
1.3.1 光电效应	(12)
1.3.2 相干散射	(13)
1.3.3 康普顿散射	(14)
1.3.4 电子对效应	(15)
1.4 射线衰减规律	(16)
1.4.1 基本概念	(16)
1.4.2 单色窄束射线衰减规律	(16)
1.4.3 线衰减系数与半厚度	(17)
1.4.4 宽束连续谱射线的衰减规律	(19)
1.5 射线检测的原理	(20)
1.5.1 射线检测的原理	(20)
1.5.2 射线检测的特点	(21)
第2章 射线检测设备	(22)
2.1 X射线机	(22)
2.1.1 X射线机的结构	(22)
2.1.2 X射线管	(24)
2.1.3 X射线机的技术性能	(26)
2.1.4 X射线机的工作过程与维护	(28)
2.2 γ 射线机	(30)
2.2.1 γ 射线机的基本结构	(31)
2.2.2 常用 γ 射线源的主要特性	(31)
2.2.3 γ 射线机与X射线机比较	(32)
2.3 加速器	(33)

2.4	射线胶片	(34)
2.4.1	射线胶片的结构	(34)
2.4.2	潜影形成	(34)
2.4.3	感光特性曲线	(35)
2.4.4	胶片的感光特性	(36)
2.4.5	射线胶片的分类与选用	(37)
2.5	射线检测辅助仪器	(39)
2.5.1	黑度计	(39)
2.5.2	增感屏	(39)
2.5.3	像质计	(41)
2.5.4	其他辅助器材	(43)
第3章	射线检测工艺	(44)
3.1	射线检测工艺的四要素	(44)
3.1.1	射线能量	(44)
3.1.2	曝光量	(48)
3.1.3	焦距	(49)
3.1.4	散射线的预防	(54)
3.2	射线检测工艺条件的选择	(57)
3.2.1	射线源的选择	(57)
3.2.2	焦距的选择	(59)
3.2.3	曝光量的选择	(59)
3.2.4	检测方式的选择	(61)
3.2.5	一次检测长度的计算	(63)
3.3	曝光曲线	(68)
3.3.1	曝光曲线的构成	(69)
3.3.2	曝光曲线的制作	(70)
3.3.3	曝光曲线的使用	(70)
3.4	射线检测灵敏度	(71)
3.4.1	射线检测影像的质量	(71)
3.4.2	IQI 灵敏度	(75)
3.4.3	影响 IQI 灵敏度的因素	(78)
3.5	有效检测范围	(80)
3.5.1	射线检测的厚度宽容度	(81)
3.5.2	平板射线检测的有效检测范围	(82)
3.5.3	圆环射线检测的有效检测范围	(83)
3.5.4	圆柱射线检测的有效检测范围	(85)
3.5.5	圆管射线检测的有效检测范围	(86)
3.6	缺陷的可检出性	(86)
3.6.1	体积类缺陷的可检出性	(87)
3.6.2	分散细小缺陷的可检出性	(87)

3.6.3	面状缺陷的可检出性	(88)
3.6.4	缺陷的可检出性与丝型 IQI 灵敏度的关系	(89)
3.6.5	不同位置缺陷的可检出性	(90)
第 4 章	其他射线检测技术	(92)
4.1	射线实时成像检测技术	(92)
4.1.1	射线实时成像原理	(92)
4.1.2	射线实时成像检测系统	(92)
4.1.3	微焦点射线实时成像	(94)
4.1.4	射线实时成像检测技术的应用	(95)
4.2	高能射线检测	(97)
4.2.1	高能射线检测设备	(97)
4.2.2	高能射线检测的特点	(101)
4.2.3	高能射线检测的技术性能	(102)
4.3	数字化射线成像技术	(103)
4.3.1	计算机射线照相技术(CR)	(103)
4.3.2	线阵列扫描成像技术(LDA)	(104)
4.3.3	数字平板成像技术(DR)	(106)
4.4	中子射线检测技术	(108)
4.4.1	中子射线检测原理	(108)
4.4.2	中子射线检测设备	(110)
4.4.3	中子射线源的类型	(111)
4.4.4	中子射线检测的应用	(112)
4.5	射线 CT 检验技术	(113)
4.5.1	CT 技术的工作原理	(113)
4.5.2	射线 CT 检测设备	(114)
4.5.3	射线 CT 检测技术性能	(115)
4.5.4	射线 CT 检测的应用	(116)
4.6	背散射检测技术	(118)
4.6.1	背散射成像原理	(118)
4.6.2	背散射成像的衬度	(119)
4.6.3	背散射系统	(120)
4.6.4	背散射测厚系统	(120)
4.6.5	β 背散射检测技术	(121)
4.7	辐射检测技术	(122)
4.7.1	辐射源的选择	(123)
4.7.2	辐射探测器	(124)
4.8	运动中的射线检测	(126)
4.8.1	运动中射线检测的特点	(126)
4.8.2	运动中射线检测的应用	(128)
4.8.3	运动中射线检测的步移技术	(130)

4.9 高速射线检测技术	(131)
4.9.1 高速射线检测用 X 射线管	(131)
4.9.2 高速射线检测图像	(131)
4.9.3 高速射线检测的应用	(133)
第5章 焊缝射线检测	(134)
5.1 焊缝射线检测原理	(134)
5.1.1 几种形式的对接接头	(134)
5.1.2 其他形式接头	(136)
5.2 焊缝射线检测工艺	(137)
5.2.1 射线检测工艺的分类	(137)
5.2.2 焊缝射线检测工艺的编制	(138)
5.2.3 焊缝射线检测工艺卡范例	(143)
5.2.4 焊缝射线检测操作	(150)
5.3 熔焊接头常见缺陷	(153)
5.3.1 熔合不良	(153)
5.3.2 裂纹	(154)
5.3.3 气孔	(155)
5.3.4 夹杂物	(156)
5.3.5 成形不良	(157)
5.4 典型焊件的射线检测	(158)
5.4.1 平板焊缝	(158)
5.4.2 环焊缝	(158)
5.4.3 小直径管对接焊缝	(162)
5.4.4 管子与管板角接焊缝	(165)
5.4.5 有余高焊件的检测	(166)
5.4.6 球罐射线检测	(168)
第6章 射线检测的评片	(173)
6.1 评片概述	(173)
6.1.1 评片的主要要求	(173)
6.1.2 评片的主要内容	(174)
6.2 缺陷识别	(174)
6.2.1 缺陷识别概述	(174)
6.2.2 焊缝常见缺陷识别	(175)
6.2.3 伪缺陷的识别	(176)
6.2.4 衍射斑纹	(177)
6.3 质量评定	(178)
6.3.1 底片质量要求	(178)
6.3.2 评片基本知识	(179)
6.3.3 射线检测质量的影响因素	(182)
6.3.4 焊接接头的质量等级评定	(187)

第 7 章 射线检测防护	(190)
7.1 射线防护概述	(190)
7.1.1 射线防护的基本概念	(190)
7.1.2 辐射损伤机理	(194)
7.1.3 射线防护的原则和标准	(196)
7.2 射线防护方法	(198)
7.2.1 射线防护的基本方法	(198)
7.2.2 照射量的计算	(199)
7.2.3 防护计算	(199)
7.2.4 屏蔽防护常用材料	(203)
7.3 射线防护的监测	(204)
7.3.1 射线防护监测内容	(204)
7.3.2 射线防护监测仪器	(205)
附录 A JB/T 4730.2—2005 有关钢制对接接头质量分级的规定	(210)
附录 B JB/T 4730.2—2005 标准规定的像质计灵敏度值	(214)
附录 C 国内外射线照相检测的部分标准目录	(216)
参考文献	(220)

第 1 章 射线检测物理基础

1.1 原子结构

X 射线的发现和 X 射线理论的发展是与原子结构理论的建立及发展密不可分的。本节首先介绍原子结构理论的建立和发展。

1.1.1 原子的核模型

原子的核模型是 1911 年由卢瑟福提出的。他假设原子内部有一个原子核，原子核具有体积小、质量大而且带正电荷的特征。带负电荷的电子则分布在与原子大小同数量级的封闭轨道上绕核旋转。对中性原子，所有电子所带负电荷之和等于原子核所带正电荷。由于这个模型假设原子有核存在，故称其为原子结构的核模型。

原子的核模型只是个假设，如果这个假设能够解释观察到的事实，并为进一步的实验所证实，假设就能为人们所接受，而且在此基础上有可能建立比较深入的理论。19 世纪末到 20 世纪初，物理学家们做了许多实验，这些实验为建立原子结构的理论奠定了基础。 α 粒子散射实验便是其中的一个。 α 粒子是放射性物质中发射出来的快速粒子，这种粒子经过后来的实验证明，它就是氦原子的原子核，其质量约为电子质量的 7300 倍，带有两个正电荷，速度为光速的十五分之一。由于速度高、质量大，因而发射的粒子具有很高的能量。用这种 α 粒子组成的平行射线束通过很薄的金属箔（金、银或铜等）后发生散射，即一些 α 粒子改变了原来的运动方向而偏转一个角度。偏转的角度绝大多数只有 $2^\circ \sim 3^\circ$ ，但有 1/8000 的 α 粒子偏转角大于 90° ，有的几乎达到 180° （和入射时的方向相反），金属原子对 α 粒子的作用造成 α 粒子运动方向的偏转。对于这种作用，可以假设为：在原子中存在着正电荷与负电荷，当带有正电荷的 α 粒子深入金属原子内部时，金属原子的正电荷对它产生斥力，而负电荷对它产生引力。由于 α 粒子的质量比电子的质量大很多倍，电子作用于 α 粒子上的力不能显著地改变 α 粒子的运动方向。所以 α 粒子的散射可以看作是受到原子内部正电荷的斥力所产生的。 α 粒子的散射情况应当与原子内正电荷的分布有关。

上述 α 粒子大角度散射情况是 1909 年观察到的一个重要现象。按照卢瑟福的模型，因为正电荷集中在原子核上，所以 α 粒子进入原子后（电子的作用仍然忽略不计），当 α 粒子离核的距离为 r 时，所受的斥力为 $2Ze^2/4\pi\epsilon_0 r^2$ （ Z 为原子序数）， r 愈小，即离核越近，斥力愈大；若 α 粒子对准中心射去（ $r \rightarrow 0$ ），则可能沿入射方向折回。这样， α 粒子的散射现象便得到了很好的解释，卢瑟福的原子核模型很快就被人们所接受。

1.1.2 玻尔的氢原子理论

我们知道，氢原子是所有原子中最简单的一种原子。从卢瑟福的原子模型来看，氢原子具有电荷为 $+e$ 的原子核和一个电荷为 $-e$ 的电子。氢原子核的质量约为电子质量的 1836 倍，称为质子。在氢原子中，电子围绕质子运动，电子运动的规律及它与原子发射光谱的关系等问题，卢瑟福的理论解决不了，这一问题由玻尔解决了。玻尔在核模型的基础上，结合原子光谱的经验规律，引入普朗克量子概念，于 1913 年对原子结构提出新的假设，从而建立了氢原子理论。依据这个理论能够准确地推导出巴尔麦公式，并能从理论上算出黎德堡常

数，与实验值非常符合。但是，玻尔理论在解决稍复杂一点的原子结构（例如氢原子）就困难了。直到 1925 年建立了量子力学之后，原子结构的理论才趋于完善。玻尔的假设是：

(1) 原子只能存在于一些不连续的稳定状态中，这些稳定状态各有一定的能量 E_1 、 E_2 、 E_3 ……，处于这些稳定状态中运动的电子虽然有加速度，但不会发生能量辐射，一切能量的改变都是由于吸收或放射辐射的结果，或者由于碰撞的结果。能量的改变只能在从一个稳定态过渡到另一个稳定态的跃迁中产生，不能任意连续地改变。

(2) 原子从能量为 E_n 的稳定态过渡到能量为 E_m 的稳定态时，其发射或吸收的单色辐射频率由下式给出：

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

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

ν ——频率，Hz。

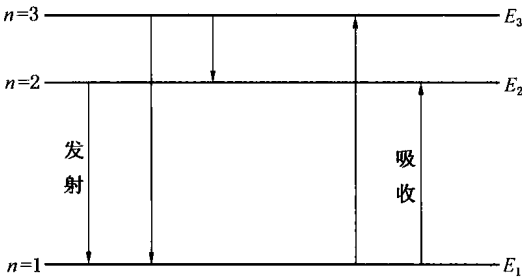


图 1-1 原子的能级

此式称为玻尔频率条件。通常可用图 1-1 的图解方法，以能级的形式表示原子的能量，而且使最低的能级与最小的能量相对应。用把各能级连接起来的箭头表示在两个能级之间发生跃迁时所辐射的谱线。在正常状态下，原子处于能量最小的稳定状态中，即处于低能级中。若受到外界的作用，原子由低能级升到较高的能级，这时原子的状态称为激发态或受激态。受激态的原子是不稳定的，当它恢复到

原来的状态时，将辐射出一定能量的谱线，谱线的频率可用式(1-1)求得。

玻尔对氢原子作了定量的计算，得出在氢原子中，电子绕核旋转的轨道半径(cm)为

$$a = 0.529177 \times 10^{-8} \times n^2 / Z \quad (1-2)$$

电子运动的能量为

$$E_n = -\frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 n^2 h^2} \quad (n = 1, 2, 3) \quad (1-3)$$

当 $n = 1, 2, 3$ ……整数时，就得到一系列不连续的能量数值 E_1 、 E_2 、 E_3 ……，我们称 n 为量子数。按照玻尔的第二个基本假设，当电子由 n_i 个轨道过渡到 n_j 轨道时所辐射的频率为

$$\tilde{\nu} = \frac{E_i - E_j}{hc} \quad (1-4)$$

应用式(1-3)得

$$\tilde{\nu} = -\frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^2 c} \left(\frac{1}{n_j^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = RZ^2 \left(\frac{1}{n_j^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (1-5)$$

这就是广义的巴尔麦公式。此时括号前的因子就是黎德堡常数的表达式：

$$R = -\frac{2\pi^2 me^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^2 c} \quad (1-6)$$

把 m 、 e 、 h 、 c 等值代入，算出：

$$R = 1.0973731 \times 10^7 \text{ m}^{-4}$$

实验值为：

$$R = 1.0967758 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

二者非常符合，说明玻尔的氢原子理论在揭示氢原子的内部结构方面是正确的。

1.1.3 原子的壳层结构

在原子中，电子被原子核所吸引，绕核作轨道旋转。量子力学指出，电子不能有任何的轨道，而只能被限制在几个不连续能级的轨道上，我们以字母 K、L、M、N、O、P 及 Q 按顺序表示这些壳层，K 层最靠近原子核，能容纳最高能量的电子，因而它被最紧密地束缚在原子中。所有轨道电子的特征是：一定的量子状态限制了它们的能量、角动量、自旋及任一层中所能容纳的电子数，例如，铀原子的 K 层有 2 个电子、L 层有 8 个电子、M 层有 18 个电子、N 层有 32 个电子、O 层有 18 个电子、P 层有 10 个电子以及 Q 层有 2 个电子。一般地说，绕核运动的电子其壳层结构按照以下的规律分布：在第 n 壳层上，最多可容纳 $2n^2$ 个电子；在第 n 壳层上的电子，又都分布在 n 个不同的支壳层上（支壳层用 η 表示），每一支壳层最多可容纳的电子数为 $2(2\eta + 1)$ ； $\eta = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$ ，这些支壳层可分别记为：s, p, d, f, g……；原子中的电子原则上从第 $n = 1$ 层开始排列，布满第一层再布第二层，依此类推。同时考虑到电子的分布将尽可能使其体系的能量为最低。凡是布满了 $2n^2$ 个电子的壳层称为闭合层，重原子的内壳层通常都是闭合层。

通常，随原子核中质子数的增加，电子从 K 层至 Q 层将按顺序逐步被充满。但有两种情况显然没有按这种法则进行：一种情况是稀土元素，它的 P 层有两个电子，而 O 层有 8 个或 9 个电子，N 层被全部充满。由于原子的化学性质仅仅取决于最外层的电子数，所以，稀土元素有相似的化学属性，并在周期表中占据相同的位置。另一种情况是镧系元素，镧系原子的 P 层和 Q 层电子未被填满，但 O 层却被填满。

化学元素周期表是依据元素的化学和物理性质，有规律性和有周期性排列的。在这种排列中，族的数目(0~8)总是表示最外层或次外层的电子数。0 族包含了那些有完整电子层结构的元素，化学性质极不活泼，是属于稀有元素或惰性气体。1 族包含的是碱金属，它们有完整的电子层结构，最外层有 1 个电子。2 族包含的是碱土金属，它们也有完整的电子层结构，最外层有两个电子。3 族包含铝族元素，包含在这族中的元素是稀土和镧系，尽管它们没有完整的内部电子层，但其最外层有 3 个电子，因此它们有基本相同的化学性质。在其他剩下的族中，就是惟一被命名为卤素的第 7 族，它们有完整的电子层结构，最外层有 7 个电子。

在具有电磁辐射(包括高能粒子辐射)的无损检测方法中，常用的、比较重要的物理常数在表 1-1 中给出，通过它们也可求出其他有用的常数。

1.1.4 基本粒子

1. 电子

富兰克林(B. Frankling)在 1750 年提出这样的假设：电的流动并不是一个连续的过程，而是许多不连续电荷的流动。1833 年迈·法拉第发表了电解定律，他发现输送一摩尔分子二价材料从一个电极到另一个电极，所消耗的电正好是一价材料的两倍。他证实了电是以成整数倍的某种电荷单元而存在。1874 年，G. Johostone Stoney 假设所有的单价离子所携带的电荷数相同，并根据法拉第的工作计算出溶液中离子的平均电荷，他称这种电荷单元为电子。虽然他的计算结果还不准确，但他的研究方向是正确的。

1909 年，R. A. Millkan 进行了一项重大实验，这项实验称为 Millikan 油滴实验，他提供了关于带电原子核特征的令人信服的证据，并因此获得了诺贝尔奖。Millikan 使用高倍数的

光学仪器，观察带电油滴的自由降落，以及在电场作用下油滴的上升速度，他还借助斯托克斯定律算出了单个微滴的电荷。他发现，计算出来的所有微滴的电荷都正好是一个最小值 ($1.5196 \times 10^{-19} \text{C}$) 的整数倍。这个实验直接找到了原子核电特性的证据。此后，许多科学工作者运用更精密的仪器和数据测量了电子的电荷。1928 年以后，借助于 X 射线衍射法，使用分格光栅或晶体点阵间隔，获得了阿伏加德罗常数的准确数值。综合阿伏加德罗常数和法拉第实验，电荷的电量值便能准确确定。表 1-2 给出了电子性质的最新数据。

表 1-1 物理常数

符 号	名 称	数 值	单 位
N_A	阿伏伽德罗常数	6.022045×10^{23}	mol^{-1}
c	真空中光速	2.997925×10^8	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
e	电子电荷	1.602189×10^{-19}	C
m_0	电子静质量	9.109534×10^{-31}	kg
h	普朗克常数	6.626176×10^{-34}	$\text{J} \cdot \text{Hz}^{-1}$
λ_0	电子康普顿波长	2.426309×10^{-12}	m
a_0	波尔半径	$0.5291771 \times 10^{-10}$	m
r_0	经典电子半径	2.817938×10^{-15}	m
H	氢原子重量	1.008128	u
U	原子质量单位	$1.6605655 \times 10^{-27}$	kg
R	电子质量与光子质量之比	1836.15152	
E_e	电子质量能量	0.511004	MeV
E_p	光子质量能量	938.2592	MeV
λ_{cp}	光子康普顿波长	1.32141×10^{-15}	m
λ_0	相应于 1eV 的波长	1.239854×10^{-6}	m
E_0	相应于 1eV 的能量	1.6021017	J

2. 质子

1827 年布朗观察到了气体分子运动的图像，称之为布朗运动。1886 年，Goldstein 观察到阳极射线流通过克鲁克斯发射管阴极的孔洞，形成了发光射线，称之为极隧射线。这种射线与阴极射线的区别在于其传播方向显示出它们是阳离子。1898 年，Wein 测出了这些阳极射线在电场和磁场中的偏转，以此为据，Wein 计算出它们的荷质比 e/m ，并且发现这个比例要比电子的比例小得多。事实上，这个比例取决于发射管中气体的种类。

Thomson 使用了能说明元素原子本质的偏转场，将不同质量的阳极射线分离开。之后，Aston、Bainbmdgeh 和 Dempster 做了更精确的测量，他们使用质谱仪展示了原子结构的全部同位素图像。所有这一切都说明，氢离子是一个基本的结构单元，它被命名为质子，其特性由表 1-3 结出。

表 1-2 电子性质

电 量	$1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
静质量	$9.109 \times 10^{-31} \text{kg}$
经典半径	$2.818 \times 10^{-15} \text{m}$
磁 矩	$-9.271 \times 10^{-24} \text{J/T}$
康普顿波长	$2.426 \times 10^{-12} \text{m}$

表 1-3 质子性质

电 量	$1.602 \times 10^{-10} \text{C}$
静质量	$1.673 \times 10^{-27} \text{kg}$
经典半径	$2.818 \times 10^{-13} \text{m}$
磁 矩	$+1.409 \times 10^{-28} \text{J/T}$
康普顿波长	$1.321 \times 10^{-15} \text{m}$

3. 中子

1930 年, Bothe 和 Becker 观察到, 当铍和锂等轻元素受到 α 粒子(氦离子)的轰击后, 会发出一种非常强烈的辐射。

1932 年, Chadwick 解开了这个疑点, 他假设, 组成这种辐射的中性粒子与质子具有相同的质量, 这个假设为我们提供了一种令人信服的图像, 并立即得到人们的承认, 他称这个粒子为中子。许多物理学家和化学家的实验完善了这个假设, 中子的性质由表 1-4 给出。

表 1-4 中子性质

电 荷	中 性	电 荷	中 性
静质量	$1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$	磁 矩	$-9.646 \times 10^{-27} \text{ J/T}$
经典半径	$1.532 \times 10^{-18} \text{ m}$	康普顿波长	$1.319 \times 10^{-15} \text{ m}$

4. 正电子

1932 年, Anderson 发现了正电子。在云室的研究中, 他注意到有一种离子, 轨迹与电子完全相同, 只是在磁场中偏转方向与电子相反。早在几年前, Dirac 的理论就预言了这种粒子的存在。1933 年, Blackett 和 Occhialini 通过实验指出, 当宇宙射线和物质相互作用时, 能给出大体等量的电子和正电子流。

更进一步的实验证实, 正电子在原子中和电子具有相同的质量、静质量以及静能量, 所带的正电荷与电子的负电荷数相等。它与电子具有相同的自旋角动量, 但它的磁距却与电子的磁距数值相等、符号相反。正电子是一种寿命极短(10^{-7} s)的粒子, 仅在运动时存在, 一旦靠近电子, 便与电子结合而形成光子(辐射湮没)。

5. 中微子

1934 年, Fermi 用连续光谱的谱线分布代替用量子论假设的离散线来解释 β 辐射时, 发现能量守恒定律出现了矛盾, 他提出了中微子的假设。他认为这种中微子其质量等于或接近零且不带电荷, 在 β 衰变过程中, 与 β 粒子共同分担其能量释放。人们已经普遍承认中微子的存在, 洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Cowan 和 Reines 提供了证实中微子存在的许多证据。

6. 介子

1934 年, Yakawa 在解释各种核粒子被原子核吸引的核力时, 第一个提出了介子的假设。1936 年, Anderson 在他的云室宇宙射线研究中, 看到了这种粒子, 它们极不稳定, 寿命非常短, 其质量小于中子但大于电子, 要么带正电荷, 要么带负电荷。进一步的实验揭示了几种类型介子的存在。大体分类为: μ 介子、 π 介子和 τ 介子, 所有的介子寿命都极短, 并能自发地衰变成一个电子或一个正电子以及一个中微子, 像带电的介子一样, 也存在中性的介子。

7. 超子

人们观察到许多各种质量的其他粒子, 统称超子, 并对它们进行了一般的分类。主要有 Λ^0 、 Σ^+ 、 Σ^- 、 Ξ^- 、 Ω^- 等, 它们的质量相当于电子的 200 倍左右, 但寿命非常短, 约 10^{-10} s 。

8. 反粒子

1955 年, Segre 与他的合作者通过实验提出了反粒子存在的证据, 这些反粒子的存在能解释早期量子论的某些矛盾。应该相信, 所有的粒子都有反粒子, 正粒子和反粒子的电荷等量、符号相反, 磁距等量、方向相反。

1.1.5 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

$$E = h\nu \quad (1-7)$$

$$P = \frac{h}{\lambda} \quad (1-8)$$

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。

在上述两式中，等式左边是光的粒子性，等式右边是光的波动性，通过普朗克常数将两者定量联系起来。

后面叙述的射线光子能量、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 之间的相互关系为

$$E = h\nu = mc^2 \quad (1-9)$$

$$P = \frac{h}{\lambda} = mv \quad (1-10)$$

德布罗意的假设在电子衍射实验中得到证实，按上式可计算出 10keV 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在着本质上的差别。

1.2 检测射线的种类和性质

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、紫外线等同属于电磁波的范畴，其区别在于波长不同以及产生的方法不同，因此 X 射线和 γ 射线都具有电磁波的共性，同时也具有不同于可见光和无线电波等的特性。

X 射线和 γ 射线是一种波长很短的电磁波，在电磁波谱上位于紫外线和宇宙射线之间（见图 1-2），其波长 λ 、频率 ν 以及光速 c 三者之间的关系是

$$\lambda = c/\nu \quad (1-11)$$

X 射线和 γ 射线都是光子流，不带电，静止质量为零，具有波粒二象性，以光速直线运动。

X 射线和 γ 射线有以下性质：

- (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) 在物质界面只能发生漫反射，折射系数接近于 1，折射方向改变不明显。
- (4) 仅在晶体光栅中才产生干涉和衍射现象。
- (5) 不可见，能够穿透可见光不能穿透的物质。
- (6) 在穿透物体过程中，会与某些物质发生复杂的物理和化学作用，如电离作用、荧光作用、热作用和光化学作用。
- (7) 具有辐射生物效应，能够杀伤生物细胞，破坏生物组织等。

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，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：一部分是波长连续变化的部分，称为连续谱，又称连续 X 射线或白色 X 射线，它的最短波长只与管电压有关；另一部分是具有分立波长的线状谱，这部分谱线一旦出现，它的谱峰所对应的波长位置完全取决于靶的材料，这部分谱线称为标识谱，又称特征谱。标识 X 射线谱重叠在连续谱之上，如同山丘上的宝塔，如图 1-2 所示。

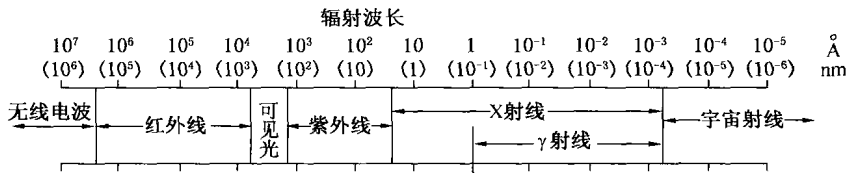


图 1-2 电磁波谱

- 1. 连续谱的产生和特点
 - 1) 连续 X 射线产生的机理

根据经典电动力学理论，带电粒子作加速运动(包括减速运动)时必然伴随着电磁辐射。在 X 射线管内高速运动的电子与靶原子碰撞时，与原子核的库仑场相互作用，由于电子急剧减速而产生电磁辐射，称为韧致辐射。

大量电子与靶相撞(例如当管电流为 5mA 时，撞到靶上的电子数目约为 3×10^{16} 个/s)，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撞击才逐渐丧失动能，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，如图 1-3 所示。

- 2) 连续谱的特点

由图 1-4 所示，连续 X 射线谱具有如下特点：

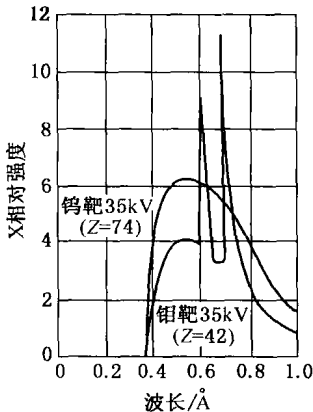


图 1-3 X 射线谱

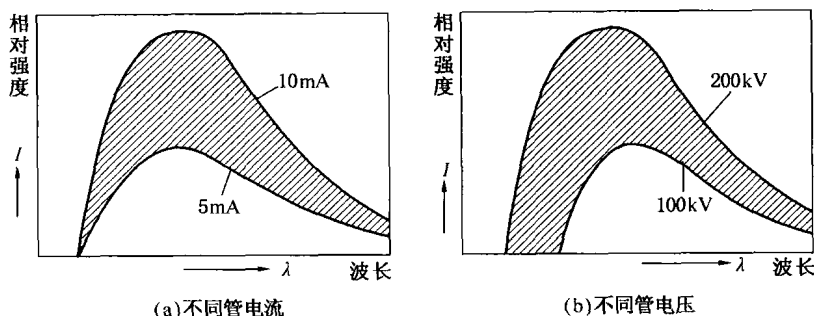


图 1-4 X 射线谱

(1) 连续 X 射线有最短波长。连续 X 射线存在一个最短波长 $\lambda_{\min}$ ，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光子的辐射能，则辐射的连续 X 射线最短波长可按下式计算：

$$E = eV = h\nu = hc/\lambda_{\min}$$

$$\lambda_{\min} = hc/eV = 12.4/V \quad (1-12)$$

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；

$\lambda_{\min}$ ——最短波长， $\text{\AA}$ 。

最短波长 $\lambda_{\min}$ 只依赖于外加电压，与靶材料无关。由图 1-4(b) 可知，随着管压的增大， $\lambda_{\min}$ 向短波长方向移动。

【例 1-1】有一台 X 射线探伤机，当管电压使用 $V = 200 \text{kV}$ 时，求产生 X 射线的最短波长是多少？

已知： $V = 200 \text{kV}$

求： $\lambda_{\min}$

解： $\lambda_{\min} = 12.4/V$

$$\lambda_{\min} = 12.4/200 = 0.062 \text{\AA}$$

答：X 射线的最短波长是 $0.062 \text{\AA}$ 。

(2) 连续 X 射线强度最大值所对应的波长 $\lambda_{\max}$ 约为 $1.5\lambda_{\min}$ 。

(3) 连续 X 射线的总强度 I_T 可用 X 射线连续谱曲线下所包含的面积表示。

试验证明， I_T 与管电流 $i(\text{mA})$ 、管电压 $V(\text{kV})$ 、靶材料原子序数 Z 有以下关系：

$$I_T = K_i Z i V^2 \quad (1-13)$$

式中 K_i ——比例系数， $K_i = (1.1 \sim 1.4) \times 10^{-6}$ 。

管电流越大，表明单位时间撞击靶的电子越多，见图 1-4(a)。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，因而短波成分的射线增加，且碰撞发生的能量转换增加，射线强度同时增大。靶材料的原子序数越大，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材料制作，如检测用的 X 射线机采用钨靶。

(4) X 射线的效率。X 射线产生的效率，等于连续 X 射线的总强度 I_T 与管电压 V 和管