



“工学结合、校企合作”高等职业教育改革创新教材

射线检测

SHEXIAN JIANCE

魏同锋 © 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“工学结合、校企合作”高等职业教育改革创新教材

射线检测

主 编 魏同锋
副主编 李丽茹 路宝学
参 编 王子瑜 高海良（企业）
孙大超（企业）
主 审 王清满（企业）



机械工业出版社

本书旨在突出职业教育的特点,以工作过程为导向,采用项目化形式编写,紧密围绕高素质技能型人才的培养目标,结合职业技能鉴定标准,融入理论和技能知识要求;教材内容注重理论实践一体,以实现教、学、做一体化教学,同时注重学习能力培养与可持续发展。

本书共设计了八个项目。主要包括:射线检测的基础知识、射线检测的设备和器材、射线透照工艺、射线透照技术、暗室处理、射线照相的底片评定、射线的辐射防护、射线检测工艺编制。

本书可作为高职高专、中职、各类成人教育金属材料检测类专业教材或培训用书,也可供从事无损检测技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

射线检测/魏同锋主编. —北京:机械工业出版社, 2014. 6

“工学结合、校企合作”高等职业教育改革创新教材

ISBN 978-7-111-47275-9

I. ①射… II. ①魏… III. ①射线检验-高等职业教育-教材
IV. ①TG115. 28

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第148171号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:齐志刚 责任编辑:齐志刚 吕芳 版式设计:霍永明
责任校对:肖琳 封面设计:张静 责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.5印张·275千字

0001—1500册

标准书号:ISBN 978-7-111-47275-9

定价:27.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书紧密结合职业教育的办学特点和教学目标，强调实践性、应用性和创新性，内容安排上主要考虑以下几点：

（1）以工作过程为主线，确定课程结构 通过对工作过程的全面了解和分析，按照工作过程的实际需要设计、组织和实施课程，突出了工作过程在课程中的主线地位，尽早地让学生进行工作实践，为学生提供了体验完整工作过程的学习机会，逐步实现从学习者到工作者的角色转换。

（2）以工作任务为引领，确定课程设置 课程内容的设置与工作任务密切联系，以工作任务来整合理论与实践，从岗位需求出发，构建任务，以典型产品为载体设计训练项目，从而增强学生适应企业的实际工作环境和完成工作任务的能力。

（3）以能力为基础，确定课程内容 以能力体系为基础取代以知识体系为基础确定课程的内容，围绕掌握能力来组织相应的知识、技能，设计相应的实践活动。同时，突出无损检测技术专业领域的新知识、新工艺和新方法，注重在项目中实践能力的养成，培养学生在复杂的工作关系中作出判断并采取行动的综合能力。

（4）教学内容以取得职业资格证书为最基本条件，并与实际工作保持一致 依据工作任务完成的需要和职业能力形成的规律，按照“学历证书与职业资格证书嵌入式”的设计要求确定课程的知识、技能等内容。

在本书的编写过程中，除参考了国内外的相关专著、教材、手册和文献外，还参考了其他行业的培训教材，并将编者在多年射线检测工作中积累的经验和在教学中的某些体会编入其中，使理论与实践有机地结合为一体。

本书由魏同锋主编，李丽茹、路宝学任副主编，参加编写的还有王子瑜、高海良、孙大超，具体编写分工如下：项目一、项目三、项目四及附录由魏同锋编写，项目二由路宝学编写，项目五、项目七由王子瑜编写，项目六由李丽茹编写，项目八由高海良、孙大超编写，全书由渤海船舶重工有限责任公司的王清满高级工程师任主审。

限于编者水平，书中难免存在缺点和不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
项目一 射线检测的基础知识	3
任务1 原子结构	3
任务2 射线的种类和性质	5
任务3 射线与物质的相互作用	9
任务4 射线衰减规律	12
综合训练	15
项目二 射线检测的设备和器材	17
任务1 X射线机	17
任务2 γ 射线机	25
任务3 射线检测器材	30
综合训练	43
项目三 射线透照工艺	46
任务1 射线照相质量影响因素分析	46
任务2 透照参数的选择	53
任务3 散射线的控制	63
综合训练	67
项目四 射线透照技术	69
任务1 纵焊缝的射线透照	69
任务2 环焊缝的射线透照	73
任务3 小径管的射线透照	83
任务4 变截面工件的射线透照	86
综合训练	93
项目五 暗室处理	96
任务1 配制显影液、定影液	96
任务2 冲洗胶片	99
综合训练	107
项目六 射线照相的底片评定	109
任务1 底片质量的评定	109
任务2 底片影像分析	113
任务3 焊接接头质量等级的评定	126



综合训练	132
项目七 射线的辐射防护	135
任务1 辐射监测	135
任务2 辐射防护的计算	142
综合训练	149
项目八 射线检测工艺编制	151
任务1 射线检测工艺规程的编制	151
任务2 射线检测工艺卡的编制	155
综合训练	165
附录	168
附录A JB/T 4730.2—2005 中各技术等级的像质计灵敏度值	168
附录B 环形对接焊接接头透照次数确定方法	169
参考文献	176

绪 论

射线检测是五种常规无损检测技术之一。它依据被检工件成分、密度、厚度等的不同，对射线（即电磁辐射或粒子辐射）产生不同程度的吸收或散射的特性，对被检工件的质量、尺寸、特性等作出判断。

一、射线检测技术的发展概况

X 射线是 1895 年由德国物理学家伦琴发现的。1912 年，美国物理学家 D. 库利吉博士研制出了新型的 X 射线管——白炽阴极 X 射线管，这种 X 射线管可以承受高电压、高电流，为 X 射线的工业应用奠定了基础。1922 年，美国马萨诸塞州的 Watertown 陆军兵工厂安装了库利吉 X 射线机，第一次完成了真正的工业射线照相。从此以后，射线照相检验技术得到了迅速发展。20 世纪 30 年代，射线照相检验技术开始进入正式工业应用。20 世纪 70 年代以后，图像增强器射线实时成像检验技术、射线层析检测技术（CT 技术、康普顿散射成像检测技术）等发展迅速。1990 年以后，射线检测技术进入了数字射线检测技术时代。

二、射线检测技术的主要方法

对于工业应用，射线检测技术已经形成了完整的方法系统，一般可划分为射线照相检测技术、射线实时成像检测技术、射线层析检测技术和其他射线检测技术四类。射线照相检测技术主要是 X 射线照相检测技术、 γ 射线照相检测技术、中子射线照相检测技术和非胶片射线照相检测技术，此外还有电子射线照相检测技术等。射线实时成像检测技术主要采用图像增强器、成像板和线阵列等构成的射线实时成像检测系统。射线层析检测技术，即 CT 技术和康普顿散射成像检测技术，主要应用在精密件、特殊结构件的研究领域。

三、射线检测技术的特点与应用

射线检测技术与其他常规无损检测技术相比较，具有的主要特点是：

- 1) 对被检验工件无特殊要求，检验结果显示直观。
- 2) 检测结果可以长期保存。
- 3) 检验技术和检验工作质量可以自我监测。

射线检测技术适用于各种材料的检验。不仅可用于金属材料（钢铁材料和非铁金属），也可用于非金属材料 and 复合材料的检验，特别是它还可以用于放射性材料的检验。射线检测对被检工件的表面和结构没有特殊要求，可适用于各种产品的检验。射线检测的原理决定了这种技术最适宜体积型缺陷（即具有一定空间分布的缺陷，特别是具有一定厚度的缺陷）



的检测。射线检测的灵敏度与一系列因素相关，除了所采用的射线照相技术外，主要是缺陷的类型、被检工件的材料与结构特点。

射线检测技术的常用范围如下：

- 1) 无损检测。铸造、焊接工艺缺陷检验，复合材料构件检验等。
- 2) 测厚。厚度在线实时测量。
- 3) 检查。机场、车站、海关检查，结构与尺寸测定等。
- 4) 研究。弹道、爆炸、核技术、铸造工艺等动态过程研究，考古研究，反馈工程等。

射线对人体可产生伤害，必须考虑辐射防护问题，必须按照国家和行业的有关标准、法规做好辐射防护工作，力求避免辐射事故。另外，射线照相检测技术对裂纹类缺陷的方向性限制以及较高的检验成本也是射线检测技术存在的主要问题。

针对常规射线检测技术存在的一些问题，近年来研究了一系列新技术，研制了新设备，如射线实时成像检测技术、CT 技术、康普顿散射成像检测技术等，这些技术在相当程度上克服了常规射线检测技术的弱点，为射线检测技术的应用开辟了重要的新领域。

射线检测的基础知识

任务 1 原子结构

► 【学习目标】

1. 了解原子与原子的结构。
2. 熟悉核外电子的运动规律。
3. 掌握原子核的衰变规律。

一、元素与原子

世界上的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，其中天然的有 90 多种，人工制造的有 10 多种。

元素是在元素周期表中按原子序数排列着的原子，这些原子从元素周期表的角度讲可称为元素，所以说，元素是原子的表现形式，原子是元素的具体存在。为便于表达和书写，每种元素都用元素符号表示，如碳 C、铁 Fe、钴 Co 等。元素的名称用元素符号和质量数来表示，如 C_{12} （C 是碳元素的符号，其质量数为 12）。

原子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。

原子质量非常小，用它的实际质量来表示很不方便。国际上以碳原子质量的 $1/12$ 作为原子质量单位，用符号 u 表示，其他原子的质量与 u 的比值，作为这种原子的相对原子质量，相对原子质量曾称原子量。照此规定，碳元素的相对原子质量为 12，氢元素的相对原子质量为 1，氧元素的相对原子质量为 16。

原子由一个原子核和若干个核外电子组成。原子核带正电荷，位于原子中心，核外电子带负电荷，在原子核周围高速运动。原子核所带正电荷数（核电荷数）与核外电子所带负电荷数相同，所以整个原子呈电中性。

原子核由质子和中子组成。质子带一个单位正电荷，中子不带电荷，原子核中有几个质子就有几个核电荷数。

核外电子的质量极小，每个电子带有一个单位负电荷。因此，在数值上有下列关系：

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

质子和中子的质量大致都相当于 $1u$ ，电子质量约是质子质量的 $1/1836$ ，计算相对原子质量时电子质量忽略不计，由此得到下列关系：

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

相对原子质量用 A 表示，质子数用 Z 表示，中子数用 N 表示，其数量关系为 $A = Z + N$ 。



例如 Co60, 相对原子质量 A 为 60, 质子数 Z 为 27, 中子数 N 为 33。

核素是指具有一定质子数、中子数并处于特定能量状态的原子或原子核。一种元素可包含多种核素。同一种元素的原子必定具有相同的核电荷数, 但中子数可以不同。也就说在元素周期表中, 一个元素占一个位置, 但同一位置上原子的性质并不一定相同。例如, 氢元素有三种原子氕、氘、氚, 它们均含有 1 个电子, 1 个质子, 但中子数分别为 0、1、2, 相对原子质量分别为 1、2、3。我们把这些处于同一位置但有不同性质的各种原子互称为同位素, 即具有相同质子数和不同中子数的同一元素的原子互称为同位素。

二、核外电子的运动规律

1913 年, 丹麦科学家玻尔提出了原子轨道和能级的概念, 揭示了核外电子的运动规律。

玻尔的原子理论假说可概括叙述如下: 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, 称为能级, 各能级的能值都是确定的。正常情况下电子总是在能量最低的轨道上运行, 这时的原子状态称为基态。

当原子从外界吸收一定能量时, 电子就由最低能量轨道跳到较高能级轨道, 这一过程称为跃迁, 此时原子的状态, 称为激发态。激发态是一种不稳定的状态, 所以电子将再次跃迁回较低能级轨道, 电子从较高能级 E_n 跃迁回到较低能级 E_m 时, 两个能级的能量值差就会以光子的形式辐射出来, 即

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

式中 $h\nu$ ——光子的能量, MeV;

E_n ——较高能级的能量值, MeV;

E_m ——较低能级的能量值, MeV。

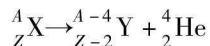
任何不稳定状态的原子必将自动回到稳定状态即回到基态, 该过程将释放出高于基态的能量, 即产生辐射。原子可以一次回到基态, 也可以逐次回到基态。

三、放射性与放射性衰变

1896 年法国物理学家贝克勒尔发现铀和含铀的矿物能发射出看不见的射线, 这种射线能使胶片感光, 能使气体电离。物质发射这种射线的性质称为放射性, 具有这种性质的元素称为放射性元素。自然界存在的放射性元素称为天然放射性元素。原子序数高于 83 的天然存在的元素都具有放射性。某些元素的同位素也具有放射性, 称为放射性同位素。

原子核由于放出某种粒子或射线而转变为新核的变化, 称为原子核的衰变。原子核自发地放射出射线转变为另一种原子核的现象, 称为放射性衰变。放射性衰变有多种形式, 其中最主要的有以下三种。

(1) α 衰变 原子核放出 α 粒子的衰变过程称为 α 衰变。 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弱, 在空气中也只能飞行几厘米, 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 衰变过程可写成如下形式:



(2) β 衰变 原子核放出 β 粒子的衰变过程称为 β 衰变。 β 粒子是负电子或正电子流, 它具有较强的穿透能力, 甚至可以穿透几毫米厚的铝, 但电离作用较弱。放出负电子的称为



β^- 衰变,放出正电子的称为 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:

$$\text{对 } \beta^- \text{ 衰变: } {}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + e^-$$

$$\text{对 } \beta^+ \text{ 衰变: } {}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + e^+$$

(3) γ 衰变 当放射性原子核发生 α 衰变或 β 衰变时,往往衰变到原子核的激发态,处于激发态的原子核是不稳定的,它要向低激发态跃迁,同时放出 γ 射线,这种现象称为 γ 跃迁或 γ 衰变。 γ 射线是波长很短的电磁波,穿透物体的能力很强,甚至可以穿透几厘米厚的铅板,但它的电离作用却很弱。 γ 射线的释放不影响原子核的核子数,衰变前后核的质量数和电荷数均不发生改变。并非每一个 α 衰变和 β 衰变都释放 γ 射线。

放射性原子核的衰变过程是自发的,但该过程却遵循一定的统计规律。衰变过程中,尚未发生衰变的原子核的数目可表示为

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-2)$$

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目;

N —— t 时刻放射性物质未发生衰变的原子核的数目;

t ——经过的衰变时间;

λ ——衰变常数,单位时间内原子核的衰变速率。

可见,原子核衰变服从指数规律。

衰变常数描述放射性元素衰变的快慢,其值越大,放射性元素衰变越快。不同的放射性元素其衰变常数不同,即各种放射性元素有自己固有的衰变速率。

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因衰变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,当 $t = T_{1/2}$ 时,放射性原子核的数目应减少至开始时数目的一半,即

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0/2$$

从此式可得

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

两边取自然对数,由于

$$\ln 2 = 0.693$$

最后得

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda \quad (1-3)$$

放射性衰变具有下面的特点:放射性元素衰变的方式和速率是由原子核本身决定的,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。

任务2 射线的种类和性质

► 【学习目标】

1. 了解射线的分类。
2. 熟悉X射线、 γ 射线的产生及特点。
3. 掌握X射线和 γ 射线的性质。



一、射线分类

通常所说的射线可以分为两类，一类是电磁辐射，另一类是粒子辐射。X射线、 γ 射线都属于电磁辐射，电磁辐射的能量是光子，电磁辐射与物质的作用是光子与物质的相互作用。

光量子的概念是1905年爱因斯坦在普朗克量子概念的基础上提出的。他认为，光是光子流，光子简称为光子。光子的能量为

$$\varepsilon = h\nu \quad (1-4)$$

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

ν ——辐射频率，Hz。

光子不带电荷，它的静止质量为0，在真空中沿直线以光速传播。光子与一般基本粒子的本质是不同的，它的静止质量为0，即只有当它运动时才具有质量，质量的大小还与它的运动速度有关，速度越大质量也越大。

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。它们与电磁辐射的基本区别是都具有确定的静止质量。粒子辐射与物质的相互作用是粒子与物质的作用，不同粒子特性不同，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。

二、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），最终以很大的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射线进行光谱测定，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，又称为连续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谱线，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，这部分谱线为标识谱，又称为特征谱。标识谱重叠在连续谱之上，如同山丘上的宝塔，如图1-1所示。

1. 连续谱的产生和特点

(1) 连续X射线的产生机理 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）时将产生电磁辐射。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，由于电子骤然减速而产生电磁辐射，称为轭致辐射。

大量电子（例如，当管电流为5mA时，撞击到靶上的电子数目约为 3×10^{16} 个/s）与靶相撞，减速过程各不相同，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

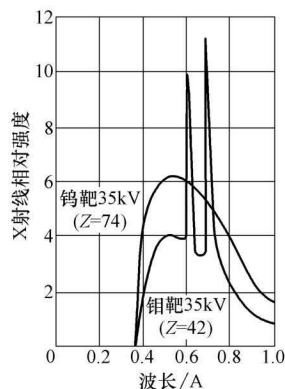


图 1-1 X射线谱

($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$)



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。

(2) 连续谱的特点 由图 1-2 所示的连续 X 射线谱可知：

1) 连续 X 射线的最短波长。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：

$$\begin{aligned} E &= eV = h\nu = hc/\lambda_{\min} \\ \lambda_{\min} &= hc/eV = 12.4/V \end{aligned} \quad (1-5)$$

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

c ——光速， m/s ；

e ——电子电量， 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 1-2b 可知，随着管电压的增大， $\lambda_{\min}$ 向短波方向移动。

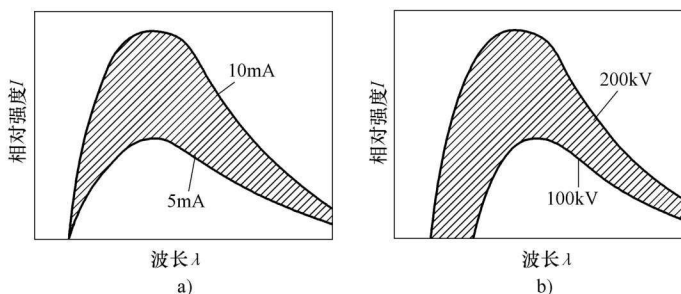


图 1-2 连续 X 射线谱

a) 不同管电流 b) 不同管电压

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 可用连续谱曲线下所包含的面积表示。试验证明， I 与管电流 i (mA)、管电压 V (kV)、靶材料原子序数 Z 有以下关系：

$$I = \alpha i Z V^2 \quad (1-6)$$

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

管电流越大，表明单位时间撞击靶的电子越多，产生的射线强度也越大，如图 1-2a 所示。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，最短波长变小，且碰撞发生的能量转换过程增加，因此，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 射线的能量。射线能量表示穿透物质的能力。X 射线能量取决于管电压，管电压是可调的，所以 X 射线的能量是可控的。

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，这种线状谱线只依赖于阳极靶的材料，而与管电压和管电流无关。因此，把这种波谱称为标识谱或称特征谱， V_K 称为激发电压，不同靶材的激发电压各不相同。例如，钨的激发电压为 69.51kV，而钨的激发电压为 20.0kV。

标识 X 射线的产生机理：当 X 射线管两端所加的电压超过某个临界值 V_K 时，阴极发射的电子可以获得足够的能量，它与阳极靶碰撞时，可以把靶原子的内层逐出壳层之外，使该原子处于激发态，此时外层电子将向内层跃迁，发射标识 X 射线。标识 X 射线光子的能量等于发生跃迁的两个能级能量值之差。

标识 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，标识谱不起什么作用。

三、 γ 射线的产生及其特点

1. γ 射线的产生机理

γ 射线是放射性同位素发生 α 衰变或 β 衰变之后，在激发态向稳定态跃迁的过程中辐射出的电磁波。 γ 跃迁是核内能级之间的跃迁，与原子的核外电子跃迁一样，可以放出光子。光子的能量等于跃迁前后两能级能量值之差。不同的是，原子的核外电子跃迁放出的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。射线检测中采用的 γ 射线主要来自 Co60、Cs137、Ir192、Tm170 等放射性同位素源。

2. γ 射线的特点

(1) γ 射线的能量 γ 射线的能量用平均能量表示，一种放射性同位素可能放出许多种能量的 γ 射线，取其辐射出的所有能量的平均值作为该同位素的辐射能量。例如放射性同位素 Co60，经过一次 β 衰变成为 2.5MeV 激发态的 Ni60，随后放出能量分别为 1.17MeV 和 1.33 MeV 的两种 γ 射线而跃迁到基态。因此 Co60 的平均能量为 $(1.17 + 1.33) \text{ MeV} / 2 = 1.25 \text{ MeV}$ 。由此可见， γ 射线的能量取决于源的种类。

(2) γ 射线的能谱 γ 射线的能谱为线状谱，线状谱只出现在特定波长的若干位置上，如 Co60 的线状光谱为 2 根（图 1-3）、Cs137 的线状谱为 1 根、Ir192 的线状谱为 24 根。

(3) γ 射线的强度 γ 射线的强度取决于放射性同位素的活度，活度是描述放射性同位素不稳定程度的量，它表示单位时间内发生衰变的核的个数，单位是贝可，符号是 Bq。1Bq 表示在 1s 的时间内有 1 个原子核发生衰变。它的专用单位是居里，符号是 Ci，其换算关系为：1Ci = 3.7×10^{10} Bq。

对于同一种 γ 射线源，放射性活度大的源在单位时间内将辐射更多的 γ 射线。但对于不同的 γ 射线源，即使放射性活度相同，也并不表示它们在单位时间内

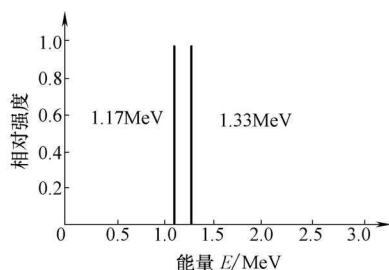


图 1-3 Co60 γ 射线的线状谱线

辐射 γ 射线光子的数目相同。这是因为核衰变时不仅产生 γ 射线，同时还伴随产生 α 射线或 β 射线，且不同的放射性同位素源产生对检测材料内缺陷起作用的 γ 射线的概率不同。例如，Co60 γ 射源的每一个核衰变放出两个能量不同的 γ 射线光子，而 Tm170 γ 射源衰变时，却不是每个核的衰变都放出 γ 射线，只有总衰变数的 8% 辐射 γ 射线。所以，放射性活



度并不等于 γ 射线的强度,因此,对于同一种放射性同位素源,放射性活度大的源其辐射的 γ 射线强度也大;但对于非同种放射性同位素的源则不一定。

四、X射线与 γ 射线的性质

X射线和 γ 射线都是波长很短的电磁波,在电磁波谱上位于紫外线和宇宙射线之间,如图1-4所示。其波长 λ 、频率 ν 以及光速 c 三者之间的关系为

$$\lambda = c/\nu \quad (1-7)$$

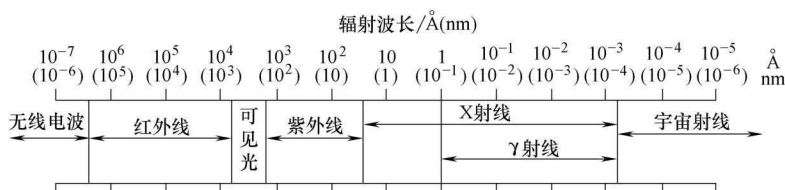


图 1-4 电磁波谱

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) 在穿透物质的过程中,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、热作用和光化学作用等。
- 7) 具有辐射生物效应,能够杀伤生物细胞、破坏生物组织等。

任务 3 射线与物质的相互作用

► 【学习目标】

1. 熟悉射线与物质发生的各种相互作用。
2. 掌握射线与物质发生各种相互作用的相对概率。

当X射线、 γ 射线射入物质后,将与物质发生复杂的作用,这些作用从本质上说是光子与物质原子的相互作用,包括光子与原子、电子及自由电子、原子核的相互作用。其中主要的作用有光电效应、康普顿散射、电子对效应和瑞利散射,由于这些作用,一部分射线被物质吸收,一部分射线被散射,使得穿透物质的射线强度减弱。

一、光电效应

当光子与物质原子的内层束缚电子作用时,光子与原子中的轨道电子发生弹性碰撞,光子的全部能量传递给轨道电子,使这个电子脱离轨道发射出去,而光子本身消失,这一现象称为光电效应。光电效应发射出的电子称为光电子。光电效应过程如图1-5所示。

光电效应的产生条件:入射光子的能量必须大于电子的结合能,光子只能与原子内层电子作用,而不能与自由电子相互作用,以保持动量守恒。



发生光电效应时,从内壳层打出电子,在此壳层上留下空位,并使原子处于激发态,原子从激发态过渡到稳定状态有两种过程:一种是外壳层电子向内层跃迁,填补空位,释放出能量,这种能量产生标识 X 射线(又称为次级 X 射线、荧光 X 射线);另一种是原子的激发能交给外壳层电子,使电子从原子中发射出去产生俄歇电子。因此,发生光电效的同时,还伴随发射标识 X 射线和俄歇电子。

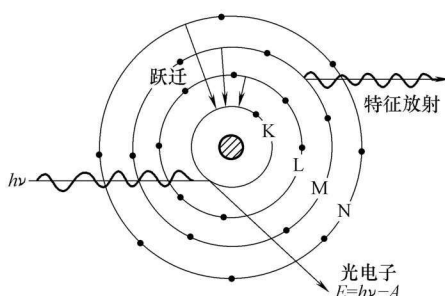


图 1-5 光电效应示意图

光电效应发生的概率随光子能量的增大而减小,随着原子序数 Z 的增大而增大。

二、康普顿散射

光子与物质原子核的外层电子或自由电子发生非弹性碰撞时,光子自身能量减少,波长变长,改变运动方向成为散射光子;电子获得光子一部分能量成为反冲电子,这一过程称为康普顿散射,如图 1-6 所示。 θ 为散射光子与入射光子方向间的夹角,称为散射角; φ 为反冲电子的反冲角。

康普顿散射只作用于原子核外束缚较小的外层电子或自由电子。入射光子的能量在反冲电子和散射光子之间进行分配,散射角越大,散射光子的能量越小,当散射角为 180° 时,散射光子的能量最小。

康普顿散射的发生概率与物质的原子序数成正比,与入射光子的能量成反比。

三、电子对效应

当光子从原子核旁经过时,在原子核的库仑场作用下,光子转化为 1 个正电子和 1 个负电子,这个过程称为电子对效应,如图 1-7 所示。

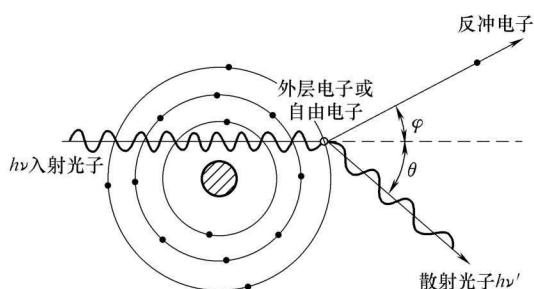


图 1-6 康普顿散射示意图

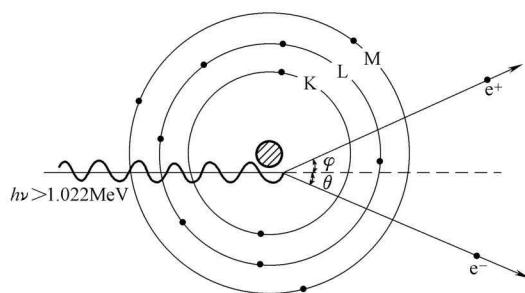


图 1-7 电子对效应示意图

电子对效应的产生条件:只有入射光子的能量大于 1.022MeV 时,才能产生电子对效应。电子对的寿命很短,它们很快湮灭生成两个能量分别为 0.511MeV 的新光子。

电子对效应发生的概率与物质的原子序数的平方成正比,与入射光子能量的对数成正比。

四、瑞利散射

瑞利散射是入射光子和束缚较牢固的内层轨道电子发生的弹性散射过程。在此过程中,一个



束缚电子吸收入射光子而跃迁到高能级，随即又放出一个能量约等于入射光子能量的散射光子，由于束缚电子未脱离原子，故反冲体是整个原子，从而光子的能量损失可忽略不计。

瑞利散射的概率大致与物质原子序数的平方成正比，并随入射光子能量的增大而急剧减小。当入射光子能量在 200keV 以下时，瑞利散射的影响不可忽略。

五、各种相互作用发生的相对概率

光电效应、康普顿散射、电子对效应的发生概率与物质的原子序数和入射光子能量有关，对于不同物质和不同能量区域，这三种效应的相对重要性不同，图 1-8 所示为按光子能量和原子序数来表示的三种相互作用占优势的区域。

由图 1-8 可以看出：

1) 对于低能量射线和原子序数高的物质，光电效应占优势。

2) 对于中等能量射线和原子序数低的物质，康普顿散射占优势。

3) 对于高能量射线和原子序数高的物质，电子对效应占优势。

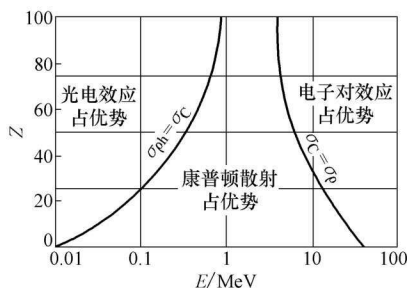


图 1-8 按光子能量 E 和原子序数 Z 来表示的三种相互作用占优势的区域

图 1-9 所示为射线与铁相互作用时，各种效应的发生概率，由图中可看出：当光子能量为 10keV 时，光电效应 σ_{ph} 占绝对优势。随着能量的增大，光电效应逐渐减少，而康普顿散射 σ_c 的影响却逐渐增大。稍过 100keV，两种效应相等，瑞利散射 σ_R 在此能量附近发生概率达到最大，但也不超过 10%。在 1MeV 左右，射线强度的衰减几乎都是康普顿散射 σ_c 造成的。光子能量继续增大，电子对效应 σ_p 引起的吸收逐渐增大，在 10MeV 左右，电子对效应与康普顿散射作用大致相等，超过 10MeV 以后，电子对效应的概率越来越大。

各种效应对射线检测质量产生不同的影响，例如，光电效应和电子对效应引起的吸收有利于提高照相对比度，而康普顿散射产生的散射线会降低对比度。轻金属试件的照相质量往往比重金属试件照相质量差；使用 1MeV 左右能量的射线检测，其对比度往往不如较低能量射线或更高能量射线，这些都是康普顿散射的影响造成的。

X 射线与物质相互作用示意图如图 1-10 所示，从中可见强度的减弱及能量的转化。

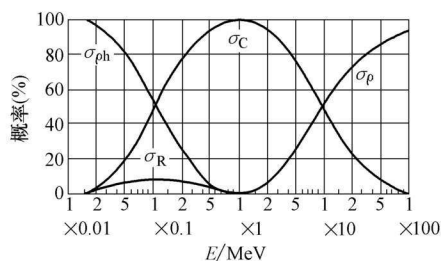


图 1-9 铁中各种效应的发生概率

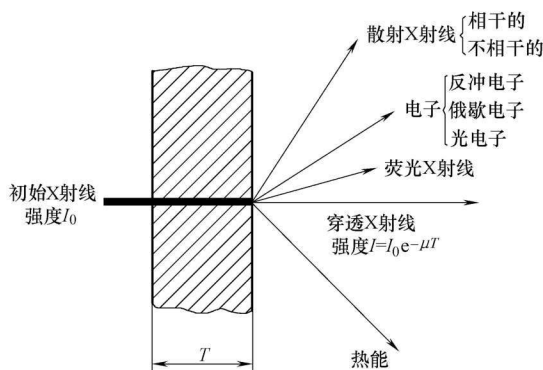


图 1-10 X 射线与物质相互作用示意图