

JINSHU CAILIAO JIANCE



职业教育金属材料检测类规划教材

射线检测

王乐生 主编

SHIEXIAN JIANCE



赠电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

职业教育金属材料检测类规划教材

射线检测

主 编 王乐生

副主编 张 发 王 义

参 编 袁 浩 陈俊敏 周文波

薛 茜 田 丽

主 审 李建军



机械工业出版社

本书旨在突出职业教育的特点,力求理论知识深度适宜,以实际应用为着眼点,结合最新的技术、设备和标准,对实际操作进行了充分的讲解。综合考虑知识的系统性及职业教育对就业的要求,除射线检测相关内容外,本书还补充了必要的材料、工艺、缺陷、相关的标准和规范及一些特殊技术的内容。

本书共分为十个单元,包括射线检测的物理基础、射线检测的设备和器材、射线检测工艺、暗室处理技术、射线照相底片的评定、射线检测技术的应用、辐射防护、射线检测工艺文件的编制、射线检测的质量管理和射线检测实验。

为便于教学,本书另配备了电子教案,选择本书作为教材的教师可来电索取(010-88379201),或登录网站 www.cmpedu.com,注册并免费下载。

本书可作为职业教育无损检测及其相关专业的教材,同时也可作为相关专业技术人员的学习和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

射线检测/王乐生主编. —北京:机械工业出版社, 2009. 8

职业教育金属材料检测类规划教材

ISBN 978-7-111-28238-9

I. 射… II. 王… III. 射线检验 - 职业教育 - 教材 IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 160280 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:王佳玮 版式设计:霍永明

责任校对:李秋荣 封面设计:王伟光 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2009 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13.25 印张 · 326 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-28238-9

定价:25.00 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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前言

为了进一步贯彻“国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定”的文件精神，加强职业教育教材建设，满足现阶段职业院校金属材料检测类专业对教材的需求，机械工业出版社于2008年8月在北京召开了“职业教育金属材料检测类专业教材建设研讨会”。在会上，来自全国的金属材料检测专业骨干教师和企业专家经过多次研究讨论，结合现阶段金属材料检测技术的发展现状及国家有关法规、标准的规定，确定了系列教材的编写计划。本书是依据高职教育培养目标编写的，是系列教材中针对射线检测技术的分册。

本书的编写原则，一是紧密围绕教学大纲，强调解决实际问题；二是突出职业教育的特点，理论与实践结合，适当增加典型应用案例等的介绍；三是内容编排按照基础理论、相关标准、编制检测规程和实验与操作的顺序进行。考虑到职业教育的就业特点——就业面广、就业部门众多，故书中补充了必要的材料、工艺、缺陷、相关的标准和规范及一些特殊技术的内容，以帮助读者更全面的理解工作过程。

本书的编写过程中，除了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一些体会编入其中，使理论与实践有机地结合为一体。

本书由王乐生主编，张发、王义任副主编，具体编写分工如下：绪论、第一单元、第八单元由王乐生编写，第二单元由王义编写，第三单元由袁浩、陈俊敏编写，第四单元由张发编写，第五单元由王义、王乐生编写，第六单元由张发、王义编写，第七单元由周文波、薛茜编写，第九单元由张发、田丽编写；第十单元由王义、袁浩、陈俊敏编写，全书由中国石油管道焊接培训中心李建军教授任主审。

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

- 一、无损检测的相关知识 1
- 二、射线检测的发展 1
- 三、射线检测的应用和特点 2

第一单元 射线检测的物理基础 3

模块一 原子与原子结构 3

- 一、元素与原子 3
- 二、核外电子运动规律 3
- 三、原子核结构 5

模块二 X射线与 γ 射线 5

- 一、X射线与 γ 射线的性质 5
- 二、X射线的产生及特点 6
- 三、放射性与放射性衰变 9

模块三 射线与物质的相互作用 10

- 一、光电效应 11
- 二、康普顿效应 11
- 三、瑞利散射 12
- 四、电子对效应 12
- 五、各种相互作用发生的相对几率 13

模块四 射线衰减规律 14

- 一、基本概念 14
- 二、单色窄束射线衰减规律 14
- 三、多色宽束射线的衰减规律 15

模块五 射线检测的原理与特点 17

- 一、射线检测的原理 17
- 二、射线照相的特点 18
- 练习 19

第二单元 射线检测的设备和器材 20

模块一 X射线机 20

- 一、X射线机的种类和特点 20
- 二、X射线管 21
- 三、高压发生器 24
- 四、X射线机的基本结构 25

- 五、X射线机的主要技术条件 28

- 六、X射线机的使用、维护和修理 29

模块二 γ 射线机 33

- 一、 γ 射线源的主要特性参数 33
- 二、 γ 射线检测设备的特点 34
- 三、 γ 射线检测设备的分类与结构 34
- 四、 γ 射线探伤机的操作 37
- 五、 γ 射线检测设备的维护及故障排除 39

模块三 管道爬行器 40

- 一、概述 40
- 二、工作原理简介 40
- 三、使用与维护 40

模块四 射线照相胶片 41

- 一、射线照相胶片的构造与特点 41
- 二、感光原理及潜影的形成 42
- 三、底片黑度 43
- 四、射线胶片的特性 43
- 五、卤化银粒度对胶片性能的影响 46
- 六、工业射线胶片系统的分类 46
- 七、胶片的使用与保管 47

模块五 射线检测辅助设备器材 48

- 一、黑度计（光密度计） 48
- 二、增感屏 48
- 三、像质计 52
- 四、其他辅助器材 53
- 练习 55

第三单元 射线检测工艺 57

模块一 射线照相灵敏度的影响因素 57

- 一、概述 57
- 二、射线照相对比度 57
- 三、射线照相清晰度 59
- 四、射线照相颗粒度 63
- 五、小结 63

模块二 灵敏度和缺陷检出的有关研究 64

- 一、最小可见对比度 $\Delta D_{\min}$ 64
- 二、射线底片黑度与照相灵敏度 65

081 三、几何因素对小缺陷对比度的影响	66
090 模块三 透照工艺条件的选择	67
281 一、射线源和能量的选择	67
291 二、焦距的选择	70
291 三、曝光量的选择与修正	73
300 模块四 散射线的控制	76
301 一、散射线的来源和分类	76
301 二、散射线的控制措施	77
301 模块五 曝光曲线的制作及应用	79
091 一、曝光曲线的制作	80
二、曝光曲线的应用	81
100 模块六 透照方式	83
101 一、透照方式的选择	83
101 二、一次透照长度	86
111 练习	91
第四单元 暗室处理技术	92
模块一 暗室基本知识	92
101 一、暗室布局	92
二、暗室设备器材的使用	93
101 三、配液注意事项	93
四、胶片处理程序和操作要点	94
111 模块二 暗室处理技术	95
一、显影	95
111 二、停显	100
三、定影	100
四、水洗和干燥	102
模块三 自动洗片机	103
一、自动洗片机的原理	103
二、自动洗片机的特点	103
三、自动洗片机的组成	104
四、自动洗片机使用时的注意事项	105
练习	105
第五单元 射线照相底片的评定	107
模块一 评片工作的基本要求	107
一、底片质量要求	107
二、评片的主要条件与环境设备要求	110
三、人员要求	111
模块二 评片基本知识	112
一、观片的基本操作	112
二、投影的基本概念	112
三、焊接缺陷的危害性及分类	114
模块三 底片影像分析	117
一、焊接缺陷影像	117
二、铸件缺陷影像	121
三、常见伪缺陷影像及识别方法	125
四、表面几何影像的识别	126
五、底片影像分析要点	127
模块四 焊接接头的质量等级评定	129
一、质量分级规定	129
二、评片实例	131
三、射线检测结果的记录与报告	133
练习	136
第六单元 射线检测技术的应用	137
模块一 典型工件的射线透照技术	137
一、大厚度比试件的透照技术	137
二、小直径管对接接头射线检测技术	138
三、T形接头射线检测技术	141
四、球罐 γ 射线全景曝光工艺	142
模块二 特殊焊接接头射线检测技术	144
一、电阻点焊接头射线检测技术	144
二、钎焊接头射线检测技术	145
模块三 其他射线检测方法与技术	146
一、高能射线照相	146
二、射线实时成像检测技术	148
三、数字化射线成像技术	152
四、中子射线照相	154
练习	157
第七单元 辐射防护	158
模块一 辐射剂量的定义、单位与标准	158
一、照射量	158
二、吸收剂量	159
三、吸收剂量与照射量的关系	159
四、剂量当量	161
模块二 剂量测定方法和仪器	162
一、辐射监测的内容及分类	162
二、剂量仪器的工作原理	163
三、剂量仪器的选择及校准	163
四、场所辐射监测仪器	164
五、个人剂量监测仪器	165
模块三 辐射损伤的机理和防护标准	166
一、辐射损伤机理	166
二、影响辐射损伤的因素	168

三、我国现行的辐射防护标准	170
模块四 辐射防护的基本方法和防护	
计算	172
一、辐射防护的基本方法	172
二、照射量的计算	175
三、防护计算	177
模块五 事故的处理程序	179
练习	180

第八单元 射线检测工艺文件的编制 .. 181

模块一 射线检测通用工艺规程	181
模块二 射线检测工艺文件	181
一、射线检测工艺卡	181
二、工艺稳定性控制	182
三、新技术、新工艺、新材料、新设备 使用的控制	182
四、射线检测工艺卡编制	183
五、焊缝透照的基本操作	185
练习	186

第九单元 射线检测的质量管理 187 |

模块一 全面质量管理	187
一、全面质量管理概述	187
二、全面质量管理和 ISO9000 族标准	187
三、质量保证体系	188
模块二 射线检测的质量管理	188

一、射线检测人员的管理	189
二、射线检测设备及器材的管理	190
三、射线检测消耗材料的管理	192
四、射线检测工艺的管理	192
五、射线检测过程的管理	195
六、射线检测设施与环境的管理	197
七、射线检测质量管理的持续改进	197
模块三 射线检测人员的健康管理	198
一、常规医学监督	198
二、放射工作人员的健康要求	199
三、放射工作人员的医学检查项目 要求	200
四、特殊人员的健康管理	200
五、放射工作人员的保健	200
练习	201

第十单元 射线检测实验 202 |

模块一 板件对接焊缝 X 射线检测工艺 实验	202
模块二 管件对接焊缝 X 射线检测工艺 实验	202
模块三 X 射线检测的评片及缺陷分析 实验	203

参考文献 205 |

绪 论

一、无损检测的相关知识

无损检测是指在不损坏检测对象的前提下,以物理或化学方法为手段,借助于先进的技术和设备器材,对检测对象内部及表面的结构、性质、状态进行检查和测试的方法。在无损检测技术的发展过程中,出现过三个名称,即无损探伤(Non-destructive Inspection)、无损检测(Non-destructive Testing)、无损评价(Non-destructive Evaluation),这三个名称体现了无损检测从探伤到评价的演变。

无损探伤是最早期的名称,其涵义是探测和发现缺陷;无损检测是当前阶段的名称,其内涵是不仅探测缺陷,还包括探测检测对象的一些其他信息,例如结构、性质、状态等,并试图通过测试,掌握更多的信息;无损评价不仅包括前两个名称的内涵,更重要的是对缺陷的形状、尺寸、位置、取向、内含物,缺陷部位的组织作出较明确的描述,尤为重要是检测缺陷部位的组织、残余应力等,结合成像技术、自动化技术、计算机数据分析和处理等技术,与材料力学、断裂力学等学科知识综合应用,对检测对象的质量和性能给出全面、准确的评价,进而对设备寿命进行评估。

对无损检测来说,设计、结构分析人员,材料、工艺人员与无损检测人员的相互协作非常重要。从事无损检测工作的技术人员除必须掌握检测方法的理论基础,正确运用检测技术,也需要对设计要求有很好的理解,对制造过程有丰富的知识,以了解不同工艺可能引起的缺陷特征,及其对材料性能的影响。

二、射线检测的发展

射线检测技术是一种重要的无损检测技术,它是依据被检工件由于成分、密度、厚度等的不同,对射线产生不同的吸收和散射的特性,从而对被检工件的质量、尺寸、特性等作出判断的方法。

1895年,德国物理学家伦琴发现X射线;1912年,美国物理学家库利吉博士研制出新型X射线管,这种X射线管可以承受高电压、高电流,为X射线的工业应用提供了基础;1922年,美国马萨诸塞州某工厂安装了库利吉X射线机,工作电压为200kV,管电流达5mA,第一次完成了真正的工业射线照相,此后,射线照相技术得到了迅速的发展;1930年前后,射线照相检测技术正式进入工业应用;1940年前后,科学家首次提出了射线照相检测的底片质量问题;1962年前后,科学家建立了完整的、至今仍在指导常规射线照相检测技术的基本理论;1970年以后,图像增强器射线实时成像检测技术、射线层析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,成像板及线阵列射线实时成像检测技术和CT技术是发展的重点。

对于工业应用,射线检测技术已形成一个完整的技术系统,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辐射测量技术四类。射线照相检测技术主要包括X射线照相检测技术、 γ 射线照相检测技术、热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。目前在工业应用中,线阵列射线实时成像检测系统显示了更优越的性能。射线层析检测技术,即CT技术和康普顿成像检测技术,主要应用在精密件、特殊结构件和研究领域。

三、射线检测的应用和特点

射线检测技术不仅可用于金属材料(钢铁材料和非铁金属)的检测,也可用于非金属材料 and 复合材料的检测,特别是它还可以用于放射性材料的检测。检测技术对被检工件或试件的表面和结构没有特殊要求,所以它可以应用于各种产品的检测。射线检测技术在工业与科学研究等方面的主要应用包括:

- 1) 探伤:铸造、焊接工艺缺陷检测、复合材料构件检测等。
 - 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。
- 射线检测技术与其他常规无损检测技术,如超声检测技术、磁粉检测技术、渗透检测技术、涡流检测技术比较,具有的主要特点是:

- 1) 对被检工件无特殊要求,检测结果显示直观。
 - 2) 检测技术和检测工作质量可以自我监测。
- 在应用中,射线检测技术需要考虑的主要问题是辐射防护问题。射线具有辐射生物效应,对人体可以产生伤害,因此在应用射线检测技术时必须考虑辐射防护问题,必须按照国家 and 地方的有关标准、法规做好辐射防护工作,应力求避免辐射事故。

第一单元 射线检测的物理基础



内容导入：射线检测的原理是射线在穿透物质时，由于吸收和散射，通过不同区域的射线强度不同，用胶片把这种差异记录下来，经过暗室处理，就得到了黑白程度不同的影像，对影像进一步分析，进而进行质量评价，可以得到指导生产的结论。射线是怎样产生的，有哪些种类，在穿透物质时与物质的相互作用等物理基础知识是本单元的主要内容。

模块一 原子与原子结构

一、元素与原子

迄今为止，已发现的元素有 100 多种，其中自然存在的有 94 种，人工合成的有十几种。为了便于表达和书写，每种元素都用特定的英文字母来表示，称为元素符号，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。

原子是元素的具体存在，是体现元素性质的最小微粒。原子质量极其微小，例如氢原子质量为 1.673×10^{-24} g，以常用质量单位表示很不方便，因此物理学中采用“原子质量单位”，用符号“u”表示，即规定碳的同位素 ^{12}C 质量的 $1/12$ 为 1u，而相对原子质量就是某元素原子的平均质量与原子质量单位的比值。照此规定，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，电子带负电荷，在原子核周围高速运动。原子核所带的正电荷与核外电子所带的负电荷数量相同，所以整个原子呈电中性，核外电子数等于核电荷数。不同元素的核电荷数不同，核外电子数也不同。原子核仍然可以再分，试验证明，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，1 个质子带 1 个单位正电荷。原子核中有几个质子，就有几个核电荷，因此得到以下关系

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

质子的质量为 1.6726×10^{-24} g，中子的质量为 1.6749×10^{-24} g，两者质量几乎相等。用原子质量单位度量，质子的质量为 1.007u，中子的质量为 1.009u，都接近于 1，而电子太轻，计算相对原子质量时可以忽略不计，由此得以下关系

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

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

某相对质量数为 A、原子序数为 Z 的原子（元素）X 则可记为 ${}_Z^AX$ 。

二、核外电子运动规律

1911 年，物理学家卢瑟福根据 α 粒子散射实验，提出了原子的核式结构模型。他设想，

原子中的带正电部分集中在很小的中心体内,即原子核,并占有原子的绝大部分质量,原子核外散布着带负电的电子。这个模型很快被广泛接受,但是核外电子的分布情况并不清楚。

1913年,物理学家玻尔在原子核式结构模型的基础上,提出了后人称为卢瑟福—玻尔原子模型的原子结构模型,即原子结构的行星模型。

原子结构的行星模型认为,原子由带正电荷的原子核和 Z 个核外电子组成, Z 为原子序数。原子核位于原子的中心,电子围绕原子核运动,但电子绕核运动的轨道不是任意的,也不能连续变化。电子只能沿一些分立的,满足一定条件的轨道运动,这些轨道称为量子轨道。

关于原子结构,玻尔提出了两条假设:一是原子只能存在于一些具有分立能量为 E_1 、 E_2 、 E_3 、…的稳定状态上。处于稳定状态的原子不辐射能量,只有在原子从一个稳定状态跃迁到另一个稳定状态时,它的能量才发生改变。这些稳定状态对应的不连续的能量数值组成原子的能级。二是原子从能量为 E_n 的稳定状态跃迁到能量为 E_m 的稳定状态时,将发射或吸收一个频率为 ν 的光子,频率由下式决定

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

式中 $h\nu$ ——光子的能量(J);

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

ν ——辐射频率(Hz)。

这个关系称为玻尔频率规则。这些稳定状态称为“定态”,能量最低的定态称为“基态”,其他定态均称为“激发态”。处于基态的自由原子相当稳定,处于激发态的原子均不稳定,在很短的时间后将释放能量回到基态。

按照玻尔的理论,原子内部的电子呈壳层分布,这些壳层称为电子壳层或电子层。电子壳层的分布按原子内电子所具有的能量大小排列而成,能量越大的电子,离核的平均距离越远。各壳层自核向外排列,最内层(在原子物理中, n 称为电子壳层的主量子数) $n=1$ 并称为K层, $n=2、3、4、5、6、7$ 等,则称为L、M、N、O、P、Q层等。

不同能量的电子运动状态不同,能量低的电子通常在核附近的区域运动,能量高的电子通常在离核较远的区域运动,也就是说,能量低的电子出现在离核较近区域的机会多,能量高的电子出现在离核较远区域的机会多。如果把在一定电子层上的电子所占据的空间称为一个“轨道”,则电子在不同的轨道上运动,但这并不是通常所说的运动轨道。按照这种理论,核外电子也可以称为轨道电子。现代物理学的观点认为,电子壳层并不表示电子在空间的确切位置,属于某一壳层的电子可以穿越另一壳层的电子轨道,这些轨道也不是一条严格确定的路径。

核外电子的分层排布(也就是其可能的运动状态)服从下列规律:

- 1) 泡利不相容原理:在同一原子中,不能存在运动状态完全相同的电子。
- 2) 能量最低原理:核外电子总是先排在可能的能量最低的轨道上,使原子的能量处于最低的状态,这时候原子才是稳定的。

按照上述规律,各层可能存在的电子数最多为 $2n^2$,即第1层最多可以存在 $2 \times 1^2 = 2$ 个电子;第2层最多可以存在 $2 \times 2^2 = 8$ 个电子,依此类推。

【想一想】

你能想象出核外电子的运动状态吗?

三、原子核结构

原子核由质子和中子组成。质子是一种物质微粒，其质量为 $1.6726 \times 10^{-24} \text{g}$ ，带有一个单位的正电荷，电量为 $1.6021892 \times 10^{-19} \text{C}$ ，中子也是一种物质微粒，其质量为 $1.6749 \times 10^{-24} \text{g}$ ，不带电荷。不同原子的原子核含有的质子数和中子数不同。原子核的半径为 10^{-14}m ，仅为原子半径的万分之一，它的体积只占原子体积的几千亿分之一，可见，在原子内部存在很大的空间，电子就在这个空间中围绕原子核旋转。

在原子核中，作用的力除了库仑力、万有引力、磁力外，还存在强大的核力，其他力远小于核力。核力具有下列特性：

- 1) 核力是一种短程力，随着距离的增大，作用力急剧减小，作用距离为 10^{-15}m 。
- 2) 核力具有饱和性，一个核子（质子、中子统称为核子）只与相邻的核子发生作用。
- 3) 核力与电荷大小无关，它比电场力强得多，质子和中子都受到核力的作用。

核力的上述性质决定了原子核的稳定特性，精确的测定发现，原子核的质量总是小于构成原子核的质子和中子的质量之和，这种现象称为质量亏损。

物质的能量和质量之间存在着密切的联系，它们之间的关系是

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

这就是著名的质能方程。这个方程说明：物质具有的能量与它的质量存在着简单的正比关系。核子在结合成原子核时出现质量亏损，所以要放出能量，大小为

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (1-3)$$

例如中子和质子组成氘核时，由于质量亏损，放出 2.2MeV 的能量，可见核反应涉及的能量十分巨大。

核子结合成原子核时释放的能量称为原子核的结合能。原子核不同，结合能也不同，每个核子的平均结合能也不同。结合能越大原子核就越稳定。

【想一想】

试推导中子和质子组成氘核时，放出 2.2MeV 的能量。

模块二 X射线与 γ 射线

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 射线与无线电波、红外线、可见光、紫外线一样都属于电磁辐射，电磁辐射的能量子是光（量子），电磁辐射与物质的作用是光子与物质的相互作用。粒子辐射是指各种粒子，如 α 粒子、 β 粒子、质子、电子、中子等，形成的粒子流。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。显然，两类辐射在本质上有不同，在与物质作用时也具有各自的规律和特点（实际上，不同的粒子辐射也不同）。从如图 1-1 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。

一、X射线与 γ 射线的性质

电磁波的波长 λ 和频率 ν 及波速（光速） c 的关系式为

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1-4)$$

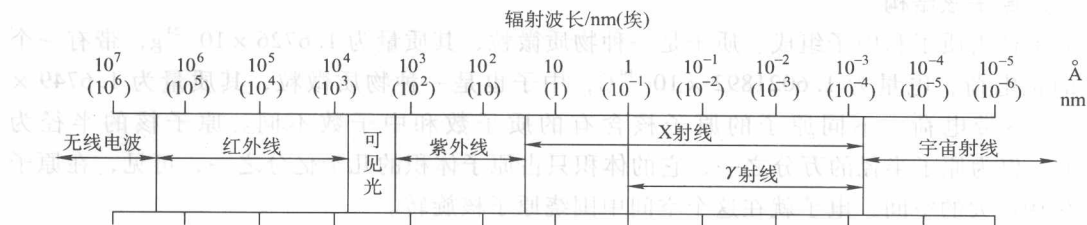


图 1-1 电磁波谱

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，但只能在非常小的缝隙中发生，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，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。

二、X 射线的产生及特点

1895 年，物理学家伦琴在暗室里做阴极射线气体放电的实验时，发现了一种奇异的射线，这种射线不可见，能使荧光材料发光，考虑到射线的神秘性及本性的不确定性，当时伦琴称之为 X 射线。实验证明，X 射线是由高速运动的电子撞击金属靶时产生的射线。高速电子急剧减速，其动能转化为电磁辐射，产生 X 射线。

在 X 射线管中产生的 X 射线，其强度随波长的分布如图 1-2 所示，这种强度随波长分布的关系称为 X 射线谱。

如图 1-2 所示，X 射线谱由两部分组成：连续 X 射线谱（钨靶）和特征 X 射线谱（钼靶，标识 X 射线谱）。连续谱是图中从最短波长开始，随着波长的增长强度逐渐变化的部分；特征谱是在某些波长的强度变化叠加在连续谱上的线状谱线部分。两种谱的特点不同，产生的机理也不同。

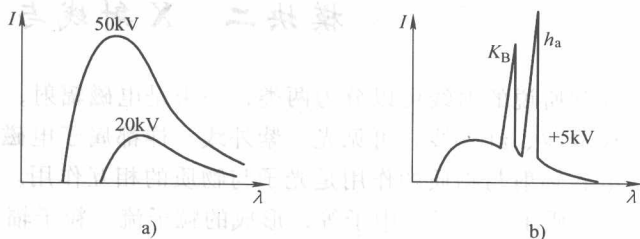


图 1-2 钨靶与钼靶 X 射线管的 X 射线谱

a) 钨靶 b) 钼靶

在 X 射线管中，灯丝加热后将发射电子，这些电子在 X 射线管两端所施加的高压电场的作用下，高速飞向阳极，那么一个电子到达阳极时获得的最大动能为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-5)$$

当它到达阳极时,如全部能量转化成动能,由此发射的光子可能有的最大能量为

$$E_k = eV = h\nu = \frac{hc}{\lambda_{\min}} \quad (1-6)$$

代入各值,得

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} = \frac{12.4}{V} \quad (1-7)$$

式中 e ——电子的电量, $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$;

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

V ——管电压 (kV);

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

在计算 X 射线的最短波长时常用此公式。

连续谱中最大强度对应的波长与最短的波长之间有以下近似的关系

$$\lambda_{\max} = 1.5 \lambda_{\min} \quad (1-8)$$

连续谱的分布特点可以理解如下:在一定加速电压下获得一定能量的大量电子,在靶面上的减速过程将是各种各样的,不同的减速过程发生的可能性不同,极少量的电子经过一次或很少次数的撞击就损失了全部的能量,多数电子需经过多次撞击过程逐渐损失掉全部能量,因此,辐射的光子能量有小有大、多种多样,这样就形成了连续谱。

对于 X 射线管,其发出的连续谱射线的总强度 I 为如图 1-2 所示的连续谱中曲线下的面积。实验可得,存在以下关系

$$I = K_i Z i V^2 \quad (1-9)$$

式中 i ——管电流 (mA);

Z ——靶物质的原子序数;

V ——管电压 (kV);

K_i ——系数,约为 $1.1 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-6}$ 。

如图 1-3 所示给出了连续 X 射线谱的强度与管电压、管电流和靶物质原子序数的基本特点。

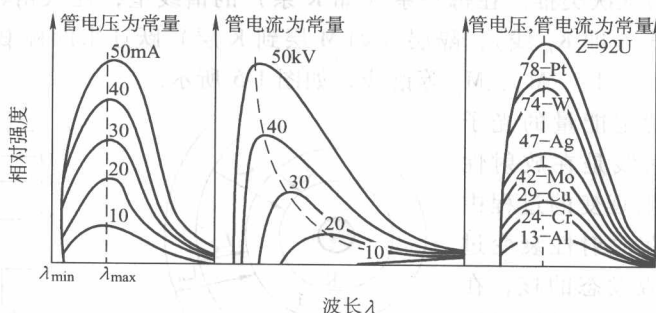


图 1-3 连续 X 射线谱的基本特点

在 X 射线管中,连续谱 X 射线转换效率 η 等于连续谱 X 射线总强度与 X 射线管输入功率之比,显然它等于

$$\eta = I/Vi = K_i Z i V^2 / Vi = K_i Z V \quad (1-10)$$

可见, X 射线的转换效率与管电压和靶物质原子序数成正比。在其他条件相同的情况下,管电压越高,转换效率越高;管电压的高压波形越接近恒电压,转换效率也越高。实际

上, X射线的转换效率是比较低的, 输入的能量绝大部分转换为热能, 例如, 当电压为100kV时, X射线的转换效率仅为1%, 而产生能量为4MeV的X射线的加速器, 其转换效率仅为36%, 所以, X射线管必须有良好的冷却装置, 以保证阳极不被烧坏。

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, 还在特定波长位置出现强度很大的线状谱线, 称为特征谱或标识谱。这种线状谱线的波长只与阳极靶的材料有关, 而与管电压和管电流无关。不同靶材料的激发电压 V_k 各不相同。如图1-4所示, 分别向钨靶和钼靶加35kV的管电压时, 由于所加电压高于钼的激发电压($V_k = 20\text{kV}$)而低于钨的激发电压($V_k = 69.51\text{kV}$), 所以钼靶的波谱上有特征谱线而钨靶的波谱上没有特征谱线。

当X射线管的管电压超过激发电压 V_k 时, 阴极发射的电子可以获得足够的能量, 与阳极靶相撞时, 可以把靶原子内层轨道的电子击出, 使内层轨道出现空穴, 邻近电子层的电子跃迁到空位, 同时放出一个光子。光子的能量等于发生跃迁的两能级能量值之差。不同原子其原子层结构不同, 各层之间的能量差也就不同, 因此, 辐射光子的能量也就不同, 形成了特定波长的光子。从这些谱线的波长能够识别原子的结构特点, 也因为如此, 才称这些谱线为特征谱线或标识谱线。特征谱的能量很低, 故在X射线检测中不起什么作用。

特征谱的主要特点是:

1) 每一谱线都有特定的波长, 电子撞击的物质不同, 这些特定波长的值也不同。

2) 特征谱可以分成若干组, 称为系, 每一系的谱线都有自己特定的结构和激发电压, 只有电子的加速电压超过激发电压时, 才能产生该系的特征谱线。

任何电子跃迁到K层时产生的谱线统称K系特征谱, 跃迁到L层时产生的谱线统称L系特征谱, 其他各层依次类推。在每一系(如K系)的谱线里, 凡从相邻层(L层到K层)跃迁来的称为 α 谱线(即 K_α 线), 隔层(如M层到K层)跃迁来的称 β 谱线(即 K_β 线), 同理产生 K_γ 、 L_α 、 L_β 、 L_γ 、 M_α 、 M_β 等谱线, 如图1-5所示。

γ 射线是具有特定能量的光子流。简单地说, γ 射线是在放射性同位素的原子核发生衰变的过程中产生的, 其实质是在放射性衰变过程中所产生的处于激发态的核, 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。

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, 但其射线均为线状谱。

γ 射线也是波长很短的电磁波, 在本质上与X射线相同。

对于一个 γ 射线放射性源, 描述它的放射性活跃程度的物理量是放射性活度。放射性活

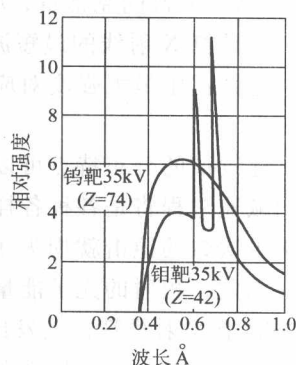


图1-4 X射线特征谱

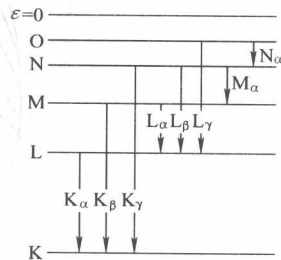
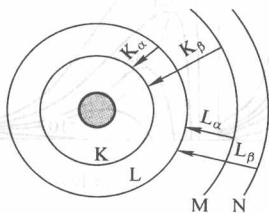


图1-5 特征谱产生示意图

度的定义为放射性源在单位时间内（通常是 1s）发生衰变的核的个数，单位名称是贝可（勒尔），单位符号是 Bq， $1\text{Bq}=1/\text{s}$ ，即 1Bq 是 1s 发生一个核的衰变。放射性衰变的专用单位符号是 Ci，其单位名称为居里

$$1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{s}^{-1}$$

它与贝可的关系是

$$1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{Bq}$$

应注意的是，活度不等于射线强度，对于同一放射性元素，活度大的辐射出射线强度也大，但对不同的放射性元素，不一定存在这样的关系。

【想一想】

当电压为 100kV 时，X 射线的转换效率仅为 1%，此时靶是什么材料？如果转换效率提高到 3%，电压需提高多少？

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。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。通过人工方法得到的放射性同位素，称为人工放射性同位素。天然放射性同位素仅有 60 多种，人工放射性同位素已有 1600 多种，在射线检测中应用的 γ 射线源，大都是人工放射性同位素。

在人们发现的 2000 种核素中，绝大部分是不稳定的，它们会自发变为另一种核素，同时放出各种射线，这种现象称为放射性衰变。放射性衰变有多种形式，其中最主要的有：

1. α 衰变

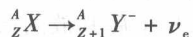
原子核放出带两个正电荷、质量数为 4 的氦核 (${}^4_2\text{He}$) 的过程称为 α 衰变。 α 射线穿透物质的能力很弱，在空气中也只能飞行几个厘米，但具有很强的电离能力。以 X 表示原来的核（母核），以 Y 表示衰变后的核（子核）， α 衰变一般表示为



2. β 衰变

原子核放出 β 粒子的衰变过程称为 β 衰变。它主要包括 β^- 衰变、 β^+ 衰变和轨道电子俘获 (EC)。

β^- 衰变放出电子，同时放出反中微子，衰变形式表示为



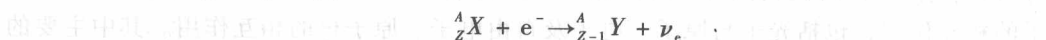
β^+ 衰变放出正电子，同时放出中微子，衰变形式表示为



β 衰变中放出的电子能量具有连续谱分布的特性。

轨道电子俘获 (EC) 的过程为：母核俘获核外轨道上的一个电子，使母核中的一个质子转为中子，过渡到子核的同时放出一个中微子。由于 K 层电子最“靠近”原子核，所以 K 层电子的俘获最易发生。

电子俘获一般可表示为



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, 穿透能力很强, 但它的电离作用却很小。

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由下式表示

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-11)$$

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

N —— t 时刻放射性物质尚未发生衰变的原子核的数目;

t ——经过的衰变时间 (s);

λ ——衰变常数, 单位时间内原子核发生衰变的几率。

可见, 原子核衰变服从指数规律。

衰变常数可以描述放射性原子核衰变的快慢, 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, 它反映了放射性物质的固有属性。

放射性原子核半数发生衰变所需的时间称为半衰期, 通常用 $T_{1/2}$ 表示, 即当 $t = T_{1/2}$ 时, $N = N_0/2$, 于是由式 (1-11) 可得

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (1-12)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1-13)$$

$T_{1/2}$ 与 λ 一样, 是放射性原子核的特征常数, λ 越大, $T_{1/2}$ 越小。

【例】已知 ^{60}Co 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 (1-13) 得

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

由式 (1-11) 得

$$\frac{N}{N_0} = e^{-0.131 \times 8} = 0.35$$

答 ^{60}Co 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%。

【想一想】

使用 γ 射线进行探伤时, 相同的透照厚度和距离, 暴光时间是否相同?

模块三 射线与物质的相互作用

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