

无损检测技术

**NON
DESTRUCTIVE
TESTING
TECHNIQUE**





无损检测技术

马铭刚 陈德安 编著
胡汝舜 裘振华

上海锅炉厂技工学校

内 容 提 要

本书是两年制技校无损检测专业的试用教材。

本书按照无损检测专业教学的需要,扼要讲授了射线、超声、磁粉、渗透、涡流五种常规无损检测的基本原理、检测方法和工艺、仪器设备以及国内外主要无损检测标准等内容。

本书在编写过程中参考了国内外同类教材和有关文献,侧重于检测方法和工艺作了较详尽而系统的论述,力求符合中国机械工程学会无损检测学会对Ⅱ级无损检测人员技术培训的要求。

本书可供无损检测Ⅱ级人员技术培训的选用,亦适合大专院校有关专业师生和生产部门的技术人员阅读参考。

无 损 检 测 技 术

马铭刚 陈德安 编著
胡汝舜 裘振华

上海锅炉厂技工学校编辑出版
(上海闵行华银路 250 号)

滁州报社印刷厂印装

开本787×1092 1/16 印张23.5 字数523 000

1982年9月第1版 1982年9月第1次印刷

印数1—6,000

(内部发行)

编 者 的 话

本书是根据我校无损检测专业教学需要编写的。可供两年制技校无损检测专业使用。也可供大中专院校有关专业师生和从事锅炉压力容器、重型机械、航空船舶及电子等设计制造工作的工程技术人员参考，有较广泛的适用性。

本书以培养学生在无损检测方面达到II级标准（中国无损检测学会关于无损检测人员技术等级划分和资格鉴定的试行规定），使学生具有无损检测独立工作的能力为主要目标。

本书扼要讲授：射线检测、超声波检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测等技术的检测原理，仪器和设备的调试，技术规范与技术标准，检测结果的分析评定等内容，对射线、超声、磁粉、渗透、涡流等常规技术近年来的发展也有适当反映。

本书在编写中考虑到我国无损检测仪器设备的系列较多和引进仪器的具体状况，暂未按国际标准统一计量单位，其中长度单位（毫米）、角度单位（度）通常不予标注和说明。

使用本书的教学参考学时：（括号内为其中的实验课时）

射线检测 140学时（30）

超声波检测 180学时（40）

磁粉检测 80学时（20）

渗透检测 70学时（20）

涡流检测 70学时（20）

本书由马铭刚同志主编审。由陈德安（第一、三、四篇）、胡汝舜（第二篇）、裘振华（第五篇）同志编写。徐丹林同志对全书作了编校。

本书在编写过程中，曾得到上海材料研究所陈祝年、姜富才、张企跃等同志和上海交通大学王怡之同志的热忱帮助和支持，在此谨表示衷心感谢。

无损检测是一门比较新的综合性检测技术，涉及到声学、光学、电磁理论、射线学、分子物理及有机、无机化学的基础理论知识，还涉及到一些比较先进的技术领域。加上我们在教学工作中还缺乏经验、时间仓促，缺点和错误在所难免，希望广大读者提出宝贵意见，以便今后改进。

编 者

1982年5月

目 录

第一篇 射线探伤法

第一章 射线检测的物理基础

§ 1-1 射线的种类和频谱	2
§ 1-2 射线的基本特性	2
§ 1-3 射线的强度	3
§ 1-4 衰减定律与衰减曲线	4
§ 1-5 射线对胶片的感光作用	7
§ 1-6 常用的射线剂量单位	9

第二章 射线的产生

§ 2-1 X射线的产生	11
§ 2-2 γ 射线的产生	22

第三章 射线照相法的工艺

§ 3-1 幅射图像和检测图像	27
§ 3-2 射线照相的反差、清晰度和梯度	27
§ 3-3 射线照相的灵敏度和图像质量指示器	28
§ 3-4 影响射线照相质量的因素	33
§ 3-5 几何不清晰度和固有不清楚度	33
§ 3-6 增感屏及其应用	37
§ 3-7 射线胶片的结构及选择	40
§ 3-8 透照厚度差的控制	45
§ 3-9 射线的入射方向	46
§ 3-10 曝光曲线及其应用	46
§ 3-11 散射线及其屏蔽	51
§ 3-12 常用的几种射线照相技术	53
§ 3-13 射线照相的现场操作	58

第四章 射线照相的暗室处理

§ 4-1 暗室的技术要求和设计	62
§ 4-2 射线照相的暗室处理	64

第五章 射线照相质量的评定

§ 5-1 射线照相本身质量的控制	75
§ 5-2 缺陷图像的分析	76

§ 5-3 射线照相质量的等级分类	78
-------------------	----

第六章 射线的安全防护

§ 6-1 射线对人体健康的影响	90
§ 6-2 安全剂量	90
§ 6-3 射线剂量测定方法	92
§ 6-4 射线的防护方法	94

第七章 射线检测技术的近期发展

§ 7-1 仪器和设备	98
§ 7-2 射线检测器材	100
§ 7-3 射线检测方法	101

第二篇 超声波探伤法

第一章 超声波检测物理基础

§ 1-1 振动与波	109
§ 1-2 超声波的传播	115
§ 1-3 超声场	120

第二章 超声波仪器、探头和试块

§ 2-1 仪器	124
§ 2-2 探头	128
§ 2-3 试块	136

第三章 超声波探伤技术

§ 3-1 脉冲反射法和穿透法	140
§ 3-2 超声波耦合方式—直接接触法和液浸法	141
§ 4-3 直接接触法的超声耦合	142

第四章 缺陷的测定

§ 4-1 缺陷的定位	146
§ 4-2 缺陷的定量	156
§ 4-3 缺陷取向的测定和形状估判	168
§ 4-4 缺陷性质分析	168
§ 4-5 噪声和非缺陷回波的判别	17

第五章 材料的超声波检测

- § 5-1 板材探伤.....174
- § 5-2 管材(无缝钢管)探伤.....184
- § 5-3 锻件探伤.....188
- § 5-4 焊缝探伤.....196

第六章 原始记录和检测报告

- § 6-1 原始记录:.....212
- § 6-2 检测报告.....212

第三篇 磁粉探伤法

第一章 磁粉检测的物理基础

- § 1-1 磁场.....215
- § 1-2 磁化.....218
- § 1-3 漏磁场.....220

第二章 磁化方法

- § 2-1 基本概念.....223
- § 2-2 磁化电流.....224
- § 2-3 通电磁化法.....227
- § 2-4 通磁磁化法.....229
- § 2-5 复合磁化法.....231
- § 2-6 旋转磁场磁化法.....232
- § 2-7 磁化方法的选择.....233

第三章 磁化技术规范

- § 3-1 周向磁场的磁化规范.....236
- § 3-2 纵向磁场的磁化规范.....236
- § 3-3 触头(磁锥)磁化规范.....237
- § 3-4 磁轭磁化规范.....237
- § 3-5 灵敏度试片.....237
- § 3-6 磁场强度测量仪.....238

第四章 磁粉和磁悬液

- § 4-1 磁粉.....240
- § 4-2 紫外线灯.....241
- § 4-3 磁悬液.....242

第五章 磁粉探伤的设备

- § 5-1 便携式磁粉探伤仪.....244
- § 5-2 固定(移动)式磁粉探伤仪.....245
- § 5-3 国外磁粉探伤仪的发展.....246

第六章 磁粉探伤的操作

- § 6-1 预处理、磁化和磁粉施加.....249
- § 6-2 磁痕的观察及判断.....249
- § 6-3 后处理(退磁).....251
- § 6-4 磁粉探伤的安全规则.....253
- § 6-5 记录和报告.....253
- § 6-6 磁粉探伤缺陷等级分类及验收.....255

第七章 其它磁力检测方法

- § 7-1 漏磁直接检测法.....257
- § 7-2 磁带检测法.....257
- § 7-3 电磁感应检测法.....258

第四篇 液体渗透探伤法

第一章 液体的特性

- § 1-1 物质分子的运动.....260
- § 1-2 液体的表面张力.....361
- § 1-3 液体对固体表面的浸润.....261
- § 1-4 液体的毛细现象.....263
- § 1-5 液体的相互乳化作用.....264

第二章 液体渗透探伤的原理及其分类

- § 2-1 液体渗透探伤原理.....266
- § 2-2 液体渗透探伤法的分类.....266
- § 2-3 液体渗透探伤法的应用.....267

第三章 液体渗透探伤液及其性能测试

- § 3-1 液体渗透探伤液.....271
- § 3-2 国内渗透探伤液的简介.....274
- § 3-3 国外渗透探伤液的简介.....275
- § 3-4 渗透探伤液的性能检查.....277

第四章 液体渗透探伤装置

- § 4-1 便携式探伤装置.....283
- § 4-2 固定式探伤装置.....284
- § 4-3 渗透探伤流水作业线的设计.....286
- § 4-4 渗透探伤装置的维护保养.....287

第五章 液体渗透探伤的操作

- § 5-1 荧光渗透探伤法(水洗性和后乳化性).....289

§ 5—2 着色渗透探伤法(溶剂清洗性)	294
§ 5—3 缺陷显示痕迹的观察及分类验收	296
§ 5—4 液体渗透探伤记录的内容	299
§ 5—5 液体渗透探伤安全规则	301

第六章 典型工件渗透探伤实例分析

§ 6—1 压力容器焊缝渗透检验	302
§ 6—2 铸件渗透探伤	303
§ 6—3 玻璃制品渗透检验	304
§ 6—4 小型不锈钢工件的渗透检验	304

第七章 液体渗透探伤法的发展

§ 7—1 探伤液	305
§ 7—2 探伤技术	305

第五篇 涡流探伤法

第一章 涡流探伤的基本原理

§ 1—1 涡流探伤的特点	307
§ 1—2 涡流探伤原理	309

第二章 涡流的产生和检测

§ 2—1 试件的电磁特性	312
§ 2—2 涡流的产生和分布	313
§ 2—3 激励频率的选择	315
§ 2—4 涡流信号的检测	317
§ 2—5 间距的影响	320
§ 2—6 阻抗图介绍	321

第三章 涡流检测线圈(探头)

§ 3—1 检测线圈的功能和组成	327
------------------------	-----

§ 3—2 检测线圈的分类和选择	327
§ 3—3 检测线圈和试件的相对运动	329
§ 3—4 信号耦合	330
§ 3—5 检测线圈的设计与性能评价	331
§ 3—6 穿过式线圈	332
§ 3—7 点式线圈	334

第四章 涡流探伤仪器

§ 4—1 涡流探伤仪器的组成	337
§ 4—2 信号处理单元	338
§ 4—3 信号显示单元	340
§ 4—4 YY—11 型涡流探伤仪简介	345

第五章 涡流探伤技术的应用

§ 5—1 涡流探伤的应用范围	346
§ 5—2 涡流探伤在工业上的应用	346
§ 5—3 涡流探伤在其他方面的应用	349

第六章 涡流探伤标准

§ 6—1 标准伤的含义	352
§ 6—2 标准伤的形状	352
§ 6—3 涡流探伤标准	353
§ 6—4 标准伤具体尺寸	356

第七章 涡流探伤设备的调整与操作

§ 7—1 涡流探伤设备综合指标	36
§ 7—2 涡流探伤设备综合指标的测定	36
§ 7—3 涡流探伤设备的使用	36
§ 7—4 涡流检验报告	36

第一篇 射线探伤法

1895年11月8日德国科学家伦琴(1845—1923)利用气体放电管在实验室中发现了一种可以穿透物体的贯穿性辐射,由于在当时对这种辐射的性质还不了解,所以被命名为X射线,后来人们为了纪念伦琴这一伟大的贡献,又把这种射线命名为伦琴射线。时隔一年,由亨利·见克勒耳(1852—1908)在利用铀盐和感光板进行实验时发现了铀能够发射一种类似于X射线的辐射线,经过进一步研究,表明产生辐射是某些元素具有的特性,并存在一定的定量关系,特别是产生这种辐射的原子以它特有的速率衰变成新的原子,这种辐射就是 γ 射线。

1911年德国米勒博士成功地制造了世界上第一只X光管,提供了产生X射线的基本元件和设备。1915年开始利用X、 γ 射线去透照物体并在感光板上获得物体的影像,这就是最早的射线照相技术。

第二次世界大战期间,随着飞机等军事工业的发展,苏联、美国等工业先进的国家,为了保证战斗飞机的质量,在飞机制造过程中广泛开始利用X射线和 γ 射线对飞机的重要零部件进行射线照相,使这一技术逐步成熟并趋向实用。

经过几十年发展,射线探伤已经是一门比较成熟的无损检测技术。它与超声波探伤、磁粉探伤、液体渗透探伤和涡流探伤并列为无损检测的五大常用技术。

射线探伤是利用X射线、 γ 射线和中子射线易于穿透物体,但在穿透物体过程中受到吸收和散射而衰减的性质,在感光材料上获得与材料内部结构和缺陷相对应的黑度不同的图象。从而探明物质内部缺陷的种类、大小、分布状况并作出评价判断。

由于射线探伤比较直观,对缺陷的尺寸和性质判断比较容易,并且有射线照相作为原始档案资料长期保存,所以射线探伤已在化工、炼油、电站设备制造、飞机、宇航、造船等工业中得到极为广泛的应用,对控制和提高产品的制造质量起了积极的作用,在现代工业中已成为一种必不可少的无损检测方法。

射线探伤对工作中的立体型缺陷(气孔、夹杂物等缺陷)具有较高的检测灵敏度,工件中平面型缺陷(裂纹未熔合等缺陷)也具有一定的检测灵敏度。但与其它常用的无损检测技术相比,对微小裂纹的检测灵敏度较低,并且生产成本高于其他无损检测技术,其检验周期也较其它无损检测技术长。

第一章 射线检测的物理基础

§ 1—1 射线的种类和频谱

射线是一种电磁辐射，所以射线的频谱范围全部在电磁波频谱之内。在射线探伤中应用的射线主要是X射线 γ 射线和中子射线。

一、X射线

X射线又称伦琴射线，X射线是在射线探伤领域中应用最广泛的一种射线。

X射线的波长范围约在 $0.006 \sim 1000 \text{ \AA}$ ($\text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm}$)之间，在X射线探伤中常用的波长范围约在 $0.01 \text{ \AA} \sim 1 \text{ \AA}$ 之间。X射线的波长范围较紫外线的波长短，所以X射线的频谱在紫外线之前，它的频率范围约在 $3 \times 10^9 \sim 5 \times 10^{14} \text{ MHz}$ 之间 (图1—1)

二、 γ 射线

γ 射线是一种波长比X射线更短的射线，它的波长范围约在 $0.003 \sim 1 \text{ \AA}$ 之间，它的频率范围约在 $3 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{15} \text{ MHz}$ 之间 (图1—1)

工业上广泛采用人工同位素产生 γ 射线，由于 γ 射线的波长比X射线更短，所以具有更大的穿透力。在无损检测中常被用来对厚度较大的工件进行射线照相。

三、中子射线

中子射线是一种类似于X射线的辐射，它是由某些物质的原子在裂变过程中逸出高速中子所产生。它的波长与热平衡的绝对温度有关。在热中子射线中 0°C 和 100°C 时的波长分别为 $1.52 \text{ \AA}$ 和 $1.30 \text{ \AA}$ 。

工业上常用人工同位素、电子加速器、反应堆来产生中子射线，在无损检测中常被用来对某些特殊部件 (如放射性核燃料元件) 进行射线照相。

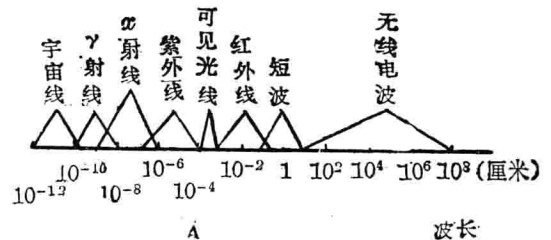


图1—1 射线的频谱

§ 1—2 射线的基本特性

经过几十年的探索，射线的特性已被人们所认识和掌握，射线的主要特性如下：

①射线是不可见的。由于射线波长极短，它仅仅是可见光线波长的几千分之一，因此人的眼睛是无法分辨的。

②射线具有穿透物质的能力。众所周知，射线波长愈短穿透物质的能力愈大，物质

的密度愈小，射线愈容易透过。

③射线是直线传播的。射线从本质上来讲与可见光一样同属于电磁波范围。所以它的传播速度与可见光一样并作直线传播。

④射线不能用棱镜或透镜的光学方法及电磁场中产生偏转，而只能用晶体光栅来改变射线的方向。

⑤射线能产生反射、干涉、绕射和折射等现象，但与可见光有明显不同之处。

⑥射线能使荧光物质发光及感光材料产生光化反应。

⑦射线能使空气电离，也能伤害、杀伤生物细胞。

§ 1—3 射线的强度

一、射线的质

根据量子学电磁波放射的量子从辐射源发出。量子的能量（E）的大小直接与它的频率（ ν ）成正比。即：

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

或者

$$E = hc/\lambda \quad (1-2)$$

式中： λ ——射线的波长

c ——射线的传播速度（ $3 \times 10^8 \text{m/sec}$ ）

h ——蒲朗克常数（ 6.62×10^{-27} 尔格/sec）

从式（1—1）、（1—2）式中可以看出，电磁波频率愈高量子所具有的能量愈高，其波长也愈短。

在实际应用时，射线束并不是单一频率的，而是一束包含不同频率的射线，这种射线称为连续射线亦称白色射线，正像太阳光中包括了许多不同波长的光线一样。

连续射线的波长有一定的范围，这与射线光子（量子）的能量有关。按式（1—1）（1—2）的推导可以得知射线的最短波长有下列关系（适合于X射线）：

$$\lambda_{\min} = 12.4/V \quad (1-3)$$

式中： $\lambda_{\min}$ ——X射线的最短波长，单位 $\text{\AA}$

V ——加在X光管两端的电压，单位kV。

X射线的最大波长（ $\lambda_{\max}$ ）约为最短波长的二倍。

射线波长愈短，射线的穿透力（射线的质）或射线的硬度也愈大。对 γ 射线来讲取决于 γ 源的能量。

二、射线的量

X射线在一定的管电压及一定的阳极材料下，X光管所产生的X射线的量是与撞击阳极靶的电子数量成正比的。在X光机中通过管电流的调节，控制由阴极射向阳极的电子数量，从而使X射线的量达到控制，所以管电流的大小间接指示了X射线的量。

三、射线的强度

一种含有各种波长的射线的强度（按照定义射线的强度是射线在单位时间内通过垂直于射线前进方向上的单位面积所传递的能量），对于各个波长来讲是不均一的，而是依照连续不同的波长作曲线 $I_\lambda = F(\lambda)$ 分布（图1—2）。

射线的强度与射线的能量也具有一定的关系。换言之在同样的管电流下，管电压愈高则X射线的强度愈大。据实验证明，X射线的强度与管电压（V）的平方成正比，并与X光管阳极材料的原子序数（Z）成正比。某处的射线强度与该处距阳极靶的距离（F）的平方成反比。所以由X光管产生的X射线强度（I）可由下式表达：

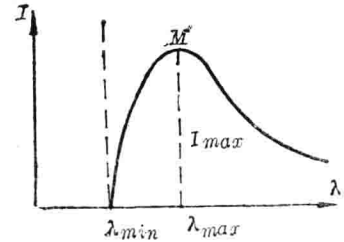


图1—2 连续射线的强度分析

(1—4)

$$I = \frac{KZV^2}{F^2}$$

式中：K——常数与仪器和度量单位有关。对一般X光机所产生的X射线来讲

$$K = (8 \pm 2) \times 10^{-7}$$

i——管电流（mA）

V——管电压（kV）

F——距离（测定X射线强度处与阳极靶之间的距离）（m）。

γ射线的强度常以γ源的居里值表示。居里数值愈高则γ源所产生的γ射线的强度愈大。它与X射线的不同之处是：X射线的强度可以由X光机上的管电压、管电流调节器控制，而γ射线的强度则无法予以调节和控制。

§ 1—4 衰减定律与衰减曲线

射线透过物质后就失去了一部分能量，这种现象称为射线的衰减。

一、与物质的相互作用

射线与物质的相互作用主要有下列三种主要过程：光电效应、康普顿效应和电子对的产生。这三种过程的共同点是都产生电子，然后电离或激发物质中的其它原子。

1. 光电效应

在蒲朗克概念中每束射线都是一个具有能量为 $E = h\nu$ 的光子。光子运动时保持着它的全部动能。光子能够撞击物质中原子轨道上的电子，在光电效应（图1—3）时释放出全部能量。光子的一部分能量把电子从原子中逐出去，剩余的能量则作为电子的动能被带走，于是该电子又在物质中引起新的电离。

当光子的能量低于1兆电子伏特（1Mev）时，光

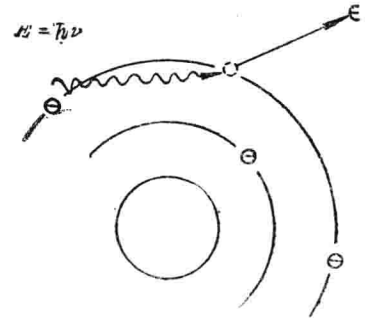


图 1—3 光电效应

电效应是极为重要的过程。另外光电效应更容易在原子序数高的物质中产生，如在铅（ $Z=82$ ）中产生光电效应的程度比在铜（ $Z=29$ ）中大得多。

2. 康普顿效应

在康普顿效应（图1—4）中，一个光子撞击一个电子时只释放出它的一部分能量，结果光子的能量减弱并且在和初始方向成 θ 角的方向上散射，而电子则在和射线初始方向成 ϕ 角的方向上散射。这一过程同样服从于能量守恒定律，即电子所具有的动能为入射光子和散射光子的能量之差，最后电子在物质中因电离原子而损失其能量。

在绝大多数的轻金属中，射线的能量大约在 $0.2\sim 3\text{Mev}$ 范围时康普顿效应是极为重要的效应。康普顿效应随着射线能量的增加而减小，其大小也取决于物质原子中的电子数。在中等原子序数的物质中，射线的衰减主要是由康普顿效应引起，在射线防护时主要侧重于康普顿效应。

3. 电子对的产生

一个具有足够能量的光子释放出它的全部动能而形成—个电子和—个正电子，这样的过程称为电子对的产生。电子对的产生发生在原子核附近（图1—5），因为只有这样才能使能量守恒。由于产生电子对所需最小的能量为 0.51Mev ，所以光子能量 $h\nu$ 必须大于 1.02Mev 。

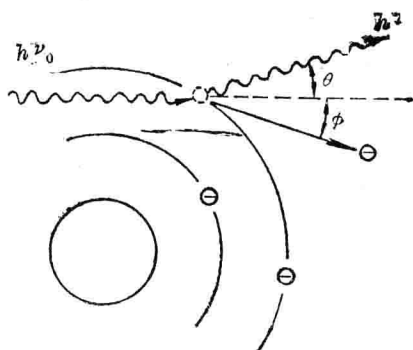


图1—4 康普顿效应

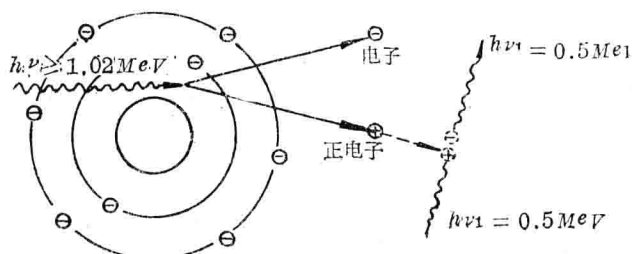


图1—5 电子对的产生和消失

当能量超过 1.02Mev 的光子把能量传递给电子和正电子作为动能时，一部分能量传给原子核以满足动量守恒。在物质中电子和正电子都是通过原子的电离而损失动能，在消失过程中正电子和物质中的电子相作用从而各成为能量为 0.51Mev 的两个光子，它们在物质中又可以通过光电效应和康普顿效应进一步相互作用。

由于产生电子对的能量条件要达到 $\geq 1.02\text{Mev}$ ，所以电子对的产生只有在高能射线中才是重要的过程，该过程正比于吸收体的原子序数的平方，所以高原子序数的物质电子对的产生也是重要的过程。

光电效应、康普顿效应和电子对的产生是射线和物质相互作用的主要方式。光电效应和康普顿效应随射线能量的增加而减少，电子对的产生则随射线能量的增加而增加，三种效应的共同结果是使射线在透过物质时能量产生衰减。

二、吸收

吸收是一种能量的转换。当射线透过物质时可以使原子离子化。当光子和物质中原子的电子相撞时，有的光子可以消耗其全部动能，使逐出的电子带有较大的速度，形成光电子，形成材料内部的散射线。有的则仅仅消耗其一部分能量。这些被逐出的电子速度较大的可以越出被照射的物体，形成散射线。有一部分电子与物质的原子相撞后，将动能转变成热能。总而言之，一次射线在原子离子化及激发二次射线的过程中消耗一定的能量，这就称为一次射线被吸收。

三、散射

射线是一种电磁波，当它透过物质时在射线的电磁场作用下，原子中的电子产生共振现象。这种强迫振动频率与入射线的频率相同，而这些振动的电子则变成了向四面八方散射的电磁波的波源，形成了射线的散射，使射线能量产生衰减。

散射线的波长（频率）除了一部分与入射线相同以外，尚有一部分散射线的波长（频率）较入射线为长（低）些，这是由于入射线中的光子与被照射物质的原子中的电子相撞时，消耗了一部分能量使这些电子逐出它们原来所处的轨道，并将一部分能量传给电子的附加速度，从而改变了波长（频率）。

四、射线的衰减定律和衰减曲线

射线的衰减是由于射线的光子与物体相互作用产生光电效应、康普顿效应或电子对的产生，使射线被吸收和散射而引起。由此可知，当射线通过物质时随着贯穿行程的增加，则射线的衰减愈严重，亦即物质愈厚，则穿透它的射线衰减的程度也愈大。

射线衰减的程度不仅与透过物质的厚度有关，而且还与射线的质（波长），物体的性质（密度和原子序数）有关。一般来讲，射线的波长愈小衰减愈小，物质的密度及原子序数增大，射线衰减也增大。但它们之间的关系并不是简单的直线关系，而是成指数关系的衰减。

设入射线的初始强度为 I_0 ，通过物质的厚度为 T ，那末射线在透过物质以后的强度 I_T 为：

$$I_T = I_0 e^{-\mu T} \quad (1-5)$$

式中： e ——自然对数的底（ $e \approx 2.72$ ）

μ ——射线能量的衰减系数

T ——被通过物质的厚度

I_0 ——射线的初始强度

由于射线的衰减包括吸收和散射，所以射线的衰减系数 μ 当是吸收系数和散射系数之和。即：

$$\mu = \tau + \sigma \quad (1-6)$$

式中： τ ——吸收系数

σ ——散射系数

因为物质密度愈大，射线在物质中传播时碰到的原子也愈多，因而射线衰减也愈大。为便于比较起见，通常采用质量衰减系数。即：

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} \quad (1-7)$$

式中: ρ ——物质的密度

τ/ρ ——质量吸收系数

σ/ρ ——质量散射系数

射线的质量吸收系数和散射系数由式(1-8), (1-9)表示:

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{C}{A} \cdot Z^4 \lambda^3 \quad (1-8)$$

$$\frac{\sigma}{\rho} = 0.4 \frac{Z}{A} \quad (1-9)$$

式中: C——常数

A——元素的原子数

Z——元素的原子序数

λ ——射线的波长

当射线透过重元素(轻元素和很短波长的射线除外)物质时,射线的衰减主要表现为吸收,由射线散射所引起的衰减可忽略不计,所以:

$$\frac{\mu}{\rho} \doteq \frac{\tau}{\rho} \doteq \frac{C}{A} \cdot Z^4 \lambda^3 \quad (1-10)$$

从式(1-5)中可以清楚看出,射线的衰减并不是呈直线比例,而是呈指数规律衰减的。图1-6所示是宽束射线的衰减曲线。

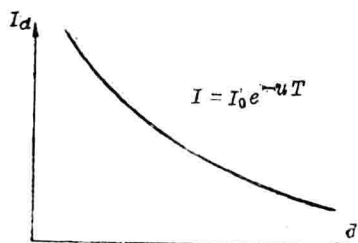


图1-6 射线的衰减曲线

§ 1-5 射线对胶片的感光作用

一、初级光化反应

射线胶片受到强度为 I_T 的射线照射时,一部分在胶片上产生反射(I_r)绝大部分产生透射(I)。剩余的部分($I_T - I_r - I$)则被胶片乳剂层中的明胶和溴化银吸收(图1-7)其中被溴化银吸收的射线产生感光作用。其过程是电子从 Br^- 中逸出,中和邻近的 Ag^+ 它的反应式为:

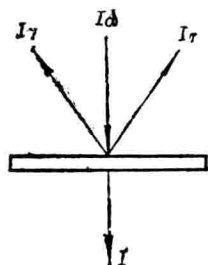
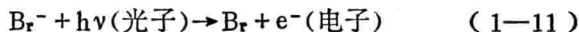


图1-7 射线的反射和透射



式(1-11), (1-12)反应式所表示的过程即为射线胶片的初级光化反应,就是一个光子分别使一对 Br^- 和 Ag^+ 形成中性原子,这也就是射线胶片的感光作用。

对同样的射线胶片来讲，射线质（波长）愈硬（短）则胶片吸收射线的强度愈大，所形成的黑度也愈大。

二、胶片曝光后的反应

胶片经初级光化反应以后，可能产生如下的逆反应：



由于 Ag^+ 和 Br^- 的游离能较 Ag 和 Br 原子小而稳定，所以胶片曝光后如果将胶片放置一段时间，式（1—13）反应的机率就增大，这种现象称为潜影衰退，这就是当射线胶片曝光后不立即显影，照相图像模糊的原因。

潜影衰退的速度和周围环境的温度有关，在低温低湿条件下衰退就小。所以一般情况下射线胶片在曝光后应立即进行暗室处理。

三、射线照相的黑度

经射线曝光后的射线胶片在暗室处理以后，溴化银即被还原成黑色的银粒子，所以在吸收射线多的地方黑度就大。

照相的黑度是随着显影时所还原的金属银的浓度而定的。假如光线射到照相上的强度为 J_0 。通过照相后的强度为 J ，如 $J = J_0$ 则这张照相完全透明。但在事实上是不可能的，光线通过物质以后总是被吸收掉一部分，所以 J 总是小于 J_0 。 J 和 J_0 之比称为照相的透明度。

$$T_0 = J/J_0 \quad (1-14)$$

若把照相分成许多厚度相等的薄层， J_1 、 J_2 ……依次为光线通过第一、第二……薄层后的光线强度，那末：

$$\text{第一层的透明度为：} \frac{J_1}{J_0} = \frac{1}{n}$$

$$\text{第二层的透明度为：} \frac{J_2}{J_1} = \frac{1}{n}$$

$$\text{第一层和第二层相加的透明度为：} T_2 = J_2/J_0 = \left(\frac{1}{n}\right)^2$$

$$\text{同理对于} m \text{层来讲则为：} T_m = \left(\frac{1}{n}\right)^m$$

$$\text{若令} n = 10, \text{ 则 } T_0 = \left(\frac{1}{10}\right)^m \text{ 或 } m = -\lg T_0。$$

因为每一薄层中单位面积内含有一定量的金属银，所以 m 是与 m 层薄层单位面积 的总银量成正比。而照相的黑度由照相所还原的金属银的量而定的，所以 m 的量即可用来表示照相的黑度。即照相的黑度：

$$D = -\lg T_0 = -\lg J/J_0。$$

则：

$$D = \lg J_0/J \quad (1-15)$$

根据式(1—15)的含义照相的黑度(或称照相的密度)是射在照相上的光线强度与通过照相后光线强度之比的对数值。

照相的黑度可以用黑度计进行绝对测量或用标准黑度片相对测定。

§ 2—6 常用的射线剂量单位

一、居里(Ci)

居里是用来表示放射性物质强度(活性)的一个常用单位,常用的单位还有毫居里(10^{-3}Ci)和微居里(10^{-6}Ci)。

一个居里单位是指放射性物质在每秒钟内原子裂变数为 3.7×10^{10} 次所释出的能量,也相当于一克镭在一秒钟内产生原子裂变所释放出的能量。

二、克镭当量

在射线探伤中也常用克镭当量来表示放射性物质的剂量。任何放射性物质相当于一克镭在一秒钟内产生裂变所释放的能量,则称为—克镭当量,克镭当量可以使用毫克镭当量(10^{-3} 克镭当量)和微克镭当量(10^{-6} 克镭当量)。

三、伦琴(物理当量伦、 γ)

伦琴是表示放射性剂量的一个常用单位。它的定义是:在标准状况下(0°C , 760mmHg),一立方厘米的空气被电离并带有一个静电单位的电荷时,空气所吸收的射线剂量称为—伦琴。

四、拉特(rad)

拉特是当前国际上通用的放射性剂量单位。它们的定义是:任何物质凡吸收射线的能量为100尔格时,其剂量为一拉特。

五、伦姆(生物当量伦、rem)

由于各种射线对生物效应不同,通常引用生物当量伦(伦姆)来表示射线剂量。它的定义是:生物组织吸收某种射线的能量,其生物作用与—伦琴剂量的X射线(γ 射线)所起的生物作用相同时称为—伦姆。

六、单位的换算

1. 居里和克镭当量的换算

由于各种放射性物质的原子裂变速率是不同的,所以各种放射性物质的放射性强度(活度)利用居里和克镭当量表示时具有一定的关系。

对常用的 ^{60}Co 和 ^{192}Ir γ 源来讲,居里和克镭当量具有下列关系:

1居里 ^{60}Co = 1.6克镭当量。

1居里 ^{192}Ir = 0.34克镭当量。

2. 居里与伦琴的换算

辐射剂量与放射性强度有一定关系。强度为N(毫居里)的放射性物质,在时间t