

无损检测 II 级培训教材

# 射线检测

**SHEXIAN  
JIANCE**

中国机械工程学会无损检测学会 编

.28

机械工业出版社



本书是无损检测学会推荐使用的Ⅱ级人员培训通用教材之一（全套教材计有五册：射线、超声、磁粉、渗透、涡流检测）。书中系统地介绍了射线检测的必要知识，反映了近年来科研和设备制造方面的新成果。在编写过程中根据Ⅱ级人员培训特点，力求实用并尽量与国际上通行的各国无损检测等级技术要求相适应。内容包括射线检测基本原理、探伤设备与器材、透照工艺、暗室处理、辐射防护、底片影象质量的评价、缺陷分类和评定、国标及其解说。全书共有插图150余幅。此外，书中还编选有250道习题及其解答，介绍了若干实验。

本书主要读者对象为生产第一线的工人、工程技术人员以及参加无损检测等级人员培训的教师、工程师；也可供质量管理人员、安全监察人员及无损检测专业的师生参考。

## 射线检测

中国机械工程学会无损检测学会 编

\*

责任编辑：方婉莹 责任校对：张 佳

封面设计：郭景云 版式设计：霍永明

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）  
（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 850×1168  $1/32$ ·印张 9·字数 235千字  
1988年10月北京第一版·1988年10月北京第一次印刷  
印数 0,001—3,200·定价：3.35元

\*

ISBN 7-111-00150-8/TH·33



## 前 言

当前,全国各地正在开展对无损检测人员技术培训和资格鉴定工作,Ⅱ级人员处于工业生产的第一线,担负着日常的检验工作,并需签发检验报告、对检验结果负责。为确保受检产品的质量,必须加速对Ⅱ级人员的培训和资格鉴定,这是一项紧迫而又繁重的任务。

为了逐步适应广泛国际经济技术合作的需要,我国与国外无损检测学会的人员资格互认的时机也正趋成熟,这就要求有一套与各国水平相协调的全国统一的无损检测培训基础教材。为此,中国机械工程学会无损检测学会在全国范围内组织力量编写了无损检测五种常规方法的教材,推荐作为全国无损检测Ⅱ级人员培训的通用教材。《射线检测》就是其中的一本。

本教材编写过程中,参考了日本和联邦德国的射线检测Ⅱ级教材以及国内各地的自编教材。教材初稿曾于1981年在南昌试用,修改稿于1982年在成都试用,再修改稿于1984年在重庆试用。1984年10月,由全国无损检测学会射线学组在丹东组织了对本教材的审定。

本书主要用作为从事射线检测的Ⅱ级人员培训教材,亦可作为设计、工艺或检验等其他人员的参考读物。内容包括:

### 1.理论知识(约84学时)

含物理基础(12学时)、仪器设备(16学时)、射线检验原理(8学时)、暗室处理(8学时)、影象质量(4学时)、物体检查(6学时)、底片评定(12学时)、中子照相(4学时)、辐射防护(8学时)、标准及其解说(6学时)。

### 2.实验知识(约32学时)

共8个实验,每个实验4学时。

### 3.习题汇编

选自日本、美国与我国无损检测学会推荐的统一参考习题共250道及其解答。

每期Ⅱ级人员培训班在采用本教材时,理论授课约84学时,进行8个实验需32学时,整理实验记录需16学时,考试6次连同考前复习约需24学时。此外,尚需补充讲授无损检测概论以及焊、铸等冶金知识共约16学时。以上总计172学时,大约折合22天,连同公休日在内,每期办班约需26天。

本书由孔凡庚主编,理论教材中第二章的X射线机部分主要为肖忠普执笔,加速器以及第九章中子照相与第十章辐射防护部分主要为石磊执笔,实验部分主要为张维疆执笔,其余部分的编著以及全书的统稿工作则由孔凡庚负责。

尽管本教材已历经三次修改和四次试用,但限于编著者水平,错误仍在所难免,欢迎读者批评指正。

本教材在组织编著过程中,陶亨咸、应崇福、赖坚、许绍高、程瑞金、王务同、张企耀等同志曾直接予以指导和支持,康纪黔、常继民、苏恒兴和孙秀琴等同志曾提出不少宝贵意见,最后由赵起良同志整理定稿,谨此表示感谢。

编 者

1988年5月

# 目 录

## 前言

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 绪论 .....                        | 1  |
| 第一章 射线检测的物理基础 .....             | 2  |
| 第一节 原子结构概述 .....                | 2  |
| 第二节 元素周期表 .....                 | 2  |
| 第三节 放射性衰变规律 .....               | 3  |
| 第四节 电磁波 .....                   | 3  |
| 第五节 光量子与物质的相互作用 .....           | 4  |
| 第六节 常用术语和单位 .....               | 6  |
| 第七节 X射线与 $\gamma$ 射线的主要性质 ..... | 11 |
| 第八节 X射线的产生 .....                | 11 |
| 第九节 X射线的波谱 .....                | 13 |
| 第十节 $\gamma$ 射线的产生 .....        | 15 |
| 第十一节 X射线与 $\gamma$ 射线的“质” ..... | 16 |
| 第十二节 物质对光量子能量的吸收规律 .....        | 17 |
| 复习思考题 .....                     | 21 |
| 第二章 射线探伤设备 .....                | 22 |
| 第一节 X射线机 .....                  | 22 |
| 第二节 $\gamma$ 射线机 .....          | 40 |
| 第三节 加速器 .....                   | 49 |
| 复习思考题 .....                     | 59 |
| 第三章 射线检验原理 .....                | 61 |
| 第一节 成像技术原理 .....                | 61 |
| 第二节 射线的质与主因衬度 .....             | 63 |
| 第三节 几何因素的影响 .....               | 64 |
| 第四节 固有不清晰度 .....                | 68 |
| 第五节 增感屏 .....                   | 69 |
| 第六节 散射线 .....                   | 77 |
| 复习思考题 .....                     | 81 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 第四章 摄影感光基本知识 .....                   | 82  |
| 第一节 X射线胶片 .....                      | 82  |
| 第二节 光学密度 .....                       | 83  |
| 第三节 胶片的特性曲线 .....                    | 83  |
| 第四节 正确曝光范围 .....                     | 87  |
| 第五节 显影时间对特性曲线的影响 .....               | 88  |
| 第六节 X射线相纸 .....                      | 91  |
| 第七节 干式射线照相法 .....                    | 91  |
| 第八节 辐射测量仪探测法 .....                   | 92  |
| 复习思考题 .....                          | 92  |
| 第五章 胶片的暗室处理 .....                    | 93  |
| 第一节 暗室 .....                         | 93  |
| 第二节 处理程序 .....                       | 95  |
| 第三节 X射线底片的贮存性能 .....                 | 103 |
| 第四节 点滴经验 .....                       | 104 |
| 第五节 胶片的自动处理 .....                    | 106 |
| 第六节 底片常见缺点及其产生的原因 .....              | 108 |
| 复习思考题 .....                          | 111 |
| 第六章 射线底片影象质量的评价 .....                | 112 |
| 第一节 描述影象质量的主要参数 .....                | 112 |
| 第二节 影象质量的评价 .....                    | 118 |
| 第三节 底片的识别界限衬度 $\Delta D_{w10}$ ..... | 123 |
| 复习思考题 .....                          | 124 |
| 第七章 工业产品的检查 .....                    | 125 |
| 第一节 透照前的准备 .....                     | 125 |
| 第二节 典型工件的透照图例 .....                  | 133 |
| 第三节 厚度变化剧烈物体的透照 .....                | 138 |
| 第四节 缺陷埋藏深度的确定 .....                  | 139 |
| 复习思考题 .....                          | 140 |
| 第八章 底片评定 .....                       | 141 |
| 第一节 常见缺陷及其在底片上的影象特征 .....            | 141 |
| 第二节 伪缺陷的出现与处理 .....                  | 147 |
| 第三节 评片要点 .....                       | 148 |

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| 第四节 评定 .....                                    | 152 |
| 第五节 检验结果的处理 .....                               | 153 |
| 复习思考题 .....                                     | 154 |
| 第九章 中子照相 .....                                  | 155 |
| 第一节 中子物理的基础知识 .....                             | 155 |
| 第二节 中子照相的一般原理和特性 .....                          | 157 |
| 第三节 中子照相应用简介 .....                              | 163 |
| 复习思考题 .....                                     | 166 |
| 第十章 辐射防护 .....                                  | 167 |
| 第一节 辐射对人体的影响及防护措施 .....                         | 167 |
| 第二节 剂量、照射量与最大容许剂量 .....                         | 172 |
| 第三节 剂量监测方法简介 .....                              | 176 |
| 第四节 几种主要防护手段 .....                              | 177 |
| 复习思考题 .....                                     | 180 |
| 第十一章 标准及其解说 .....                               | 181 |
| 第一节 标准的种类 .....                                 | 181 |
| 第二节 中国国家标准GB 3323—82<br>《钢焊缝射线照相及底片等级分类法》 ..... | 181 |
| 参考文献 .....                                      | 199 |
| 射线检测实验教材 .....                                  | 200 |
| 实验说明 .....                                      | 200 |
| 实验一 制作曝光曲线 .....                                | 200 |
| 实验二 射线硬度对检测灵敏度和照相衬度的影响 .....                    | 202 |
| 实验三 制作胶片特性曲线 .....                              | 204 |
| 实验四 测定铅箔与锡箔的增感系数 .....                          | 206 |
| 实验五 曝光量与焦距的关系 .....                             | 208 |
| 实验六 测量X射线管焦点尺寸 .....                            | 209 |
| 实验七 双重曝光法测定缺陷埋藏深度 .....                         | 211 |
| 实验八 不同衬底材料对底片灰雾的影响 .....                        | 213 |
| 参考文献 .....                                      | 214 |
| 射线检测Ⅱ级教材习题及其解答 .....                            | 215 |
| 附录 日本Ⅱ级射线人员习题及其解答 .....                         | 245 |

## 绪 论

自从1895年德国伦琴发现 X 射线以来,不久法国人又发现了放射性。到20世纪30年代,人们又发现了中子。此后,射线应用才日益广泛。

目前,射线探伤作为一种行之有效而又不可缺少的检验手段,正为工业上许多部门所采用,这是由于它具有如下众多优点:

首先,它适用于几乎所有材料,而且对试件形状及其表面粗糙度均无严格要求,对厚至0.5m的钢或薄如纸片的树叶、邮票、油画及纸币等均可检查其内部质量。

其次,它能直观地显示缺陷影象,便于对缺陷的定性、定量与定位。

第三,射线底片能长期存档备查,便于分析事故原因。

当然,射线探伤也有其局限性。例如检查厚度还不够大;难于发现垂直射线方向的薄层缺陷;检查费用也较高。此外,射线对人体有害,需作特殊防护。因此,在一般情况下,射线探伤方法多与磁粉、渗透或超声等探伤方法联合使用。

近年来,随着计算机与电子科学的发展,图象处理技术的改进,已使得工业射线电视系统的成象质量显著提高,自动识别缺陷也逐渐成为可能,看来射线探伤自动化检查已指日可待。此外,金属陶瓷 X 射线管与计算机辅助的X射线层析扫描装置的完善、中子照相方法的研究以及微焦点X射线机的出现等新技术正在持续不断地将射线检测技术推向前进。

## 第一章 射线检测的物理基础

射线，又称为辐射，一般分为非电离辐射与电离辐射两类。前者是指那些能量很低，因而不足以引起物质发生电离的射线（如微波辐射、红外线等）；而后者则是指那些能够直接或间接引起物质电离的射线。

直接电离辐射通常是那些带电粒子，如阴极射线、 $\beta$ 射线、 $\alpha$ 射线和质子射线等。由于它们带有电荷，所以在与物质发生作用时，要受原子的库伦场的作用发生偏转。同时，会以使物质中原子激发、电离或本身产生轫致辐射的方式损失其能量，故其穿透本领较差。

而间接电离辐射是不带电的粒子，如X射线、 $\gamma$ 射线及中子射线等。由于它们属于电中性，不会受到库伦场的影响而发生偏转，且贯穿物质的本领较强，故广泛地被用作无损检测的射线源。

### 第一节 原子结构概述

一切物体均由原子组成。原子的构造与太阳系有些相似。其中心是一个重的带正电的核，核内主要由质量基本相等的中子与质子组成，中子基本不带电，质子带正电，原子核只占原子体积的极小部分，核外有带负电荷的电子在不同的轨道上绕核旋转。

电子电荷与质子电荷基本相等而符号相反，由于核内质子数等于绕核旋转的轨道电子数，所以整个原子呈中性。

### 第二节 元素周期表

门捷列夫于1869年创立周期律，他指出：如将元素按其原子量大小顺序排列起来，则元素的化学性质将会发生周期地变化。

现已证明，周期表内各元素是按其质子数（即质子序数）顺序排列的，但二者差别极小。

### 第三节 放射性衰变规律

自然界存在如铀-镭系与钍系等元素，它们可自发地放出射线而转变为其它元素，这些元素称为放射性元素。实验表明，射线是由这些元素的原子核放出的，上述转变实际上是核的转变，或称为原子核的衰变，其衰变速率不受外界环境如温度、压力、电磁场等物理与化学条件的影响，目前尚无法加以控制。

由于从时刻  $t$  到  $t + dt$  间隔内，原子衰变的数目  $(-dN)$  应在  $t$  时刻尚未衰变的原子数目  $N$  以及所经过的时间间隔  $dt$  成比例，亦即

$$-dN = \lambda N dt$$

式中  $\lambda$  是衰变常数。如果当  $t = 0$  时的原子数目为  $N_0$ ，则上式经过积分并整理后可得出

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

这就是放射性衰变规律。

### 第四节 电 磁 波

X 射线（包括高能 X 射线）、 $\gamma$  射线、宇宙射线与无线电波、红外线、可见光、紫外线一样，都是电磁波。在真空中，它们以每秒约  $3.0 \times 10^8 \text{ km}$  的光速传播。波长  $\lambda$ 、频率  $\nu$  和光速  $c$  之间的关系为

$$c = \lambda \nu$$

图1-1为各种电磁波波长的大致范围。

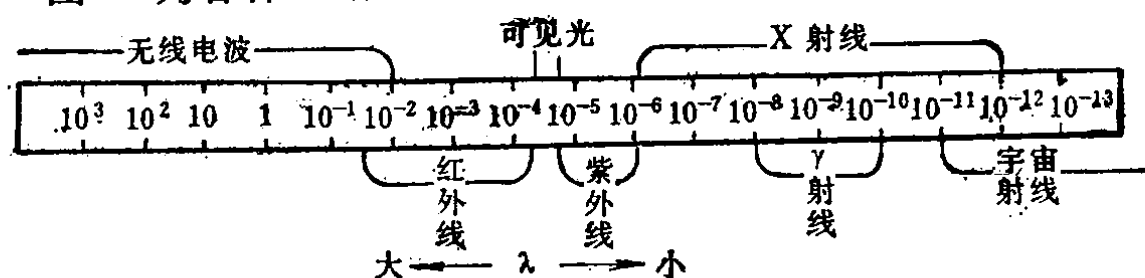


图1-1 各种电磁波的波长范围(cm)

现已证明，电磁波既有波动性，也有粒子性。尤其对于波长短的 X 射线与  $\gamma$  射线，其粒子性十分明显，而可将它们视为以光速运动的光量子（简称光子）群。光量子不带电荷，不能静止存在，静止质量为零。光量子具有的能量为

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

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

$\nu$ ——频率；

$c$ ——光速，等于  $2.998 \times 10^{10} \text{cm/s}$ 。

## 第五节 光量子与物质的相互作用

当光量子（X 射线、 $\gamma$  射线等）射进物体时，其强度会因光电效应、康-吴散射与电子对的生成等三种形式的作用而减弱。究竟以哪种作用为主则决定于光量子的能量以及被照射的材料。下面简介这些作用。

### 一、光电效应

当较低能量量子（ $10 \sim 500 \text{keV}$ ）的光量子射入物质时，光量子可能击中物质原子轨道上的任一电子，光量子将其全部能量给与这个轨道电子后被吸收而消失。电子获得了光量子的能量，脱离原子而运动，并被称为光电子。失去电子的原子即被电离。这一现象称为**光电效应**。光电子在物质中运动，逐渐损失能量而被阻止；电离的原子也将重新获得电子，发生特征 X 射线辐射等而

低能量入射光量子

被击出的电子

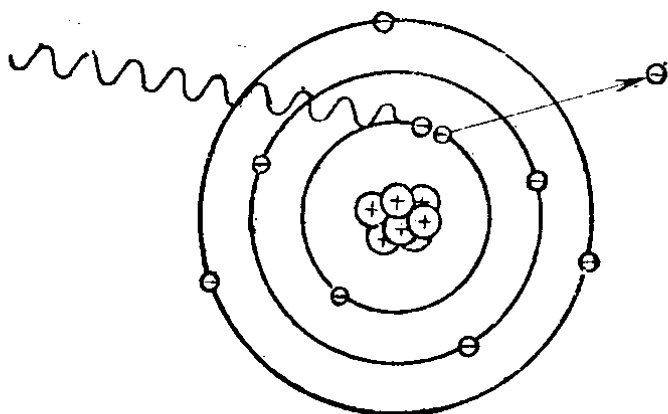


图1-2 光电效应

恢复稳定状态。

光电效应既发生在被射线照射的物体中，又发生在影象检测器（荧光屏或胶片）内，也就是这种效应使得射线照相成为可能。光电效应随着物质原子序数增高而加强，随着光量子能量增高而减弱。

需要顺便指出的是，随着光电效应的发生，必然会伴有标识X射线（或称荧光X射线）的发射。这是因为这种效应发生在内电子层的几率更大的缘故。

## 二、康普顿-吴有训散射

这种散射效应是美国科学家康普顿与我国科学家吴有训共同发现的，或简称康-吴散射，它是当光量子碰撞到自由电子或物质原子中与核结合较松的外层价电子时，可能将其部分能量转移给电子而使其被击出（图1-3），该光量子同时将偏离原入射方向而沿新路前进。被击出的电子称为反冲电子。在 $0.1\sim 10\text{MeV}$ 范围，辐射的衰减主要是由于康-吴散射。对如铝等轻元素较易产生。

由于康-吴散射使入射光子偏离其入射方向，在射线照相中它可使底片增大曝光灰雾而降低照相衬度，故必须采取各种措施严加防范。

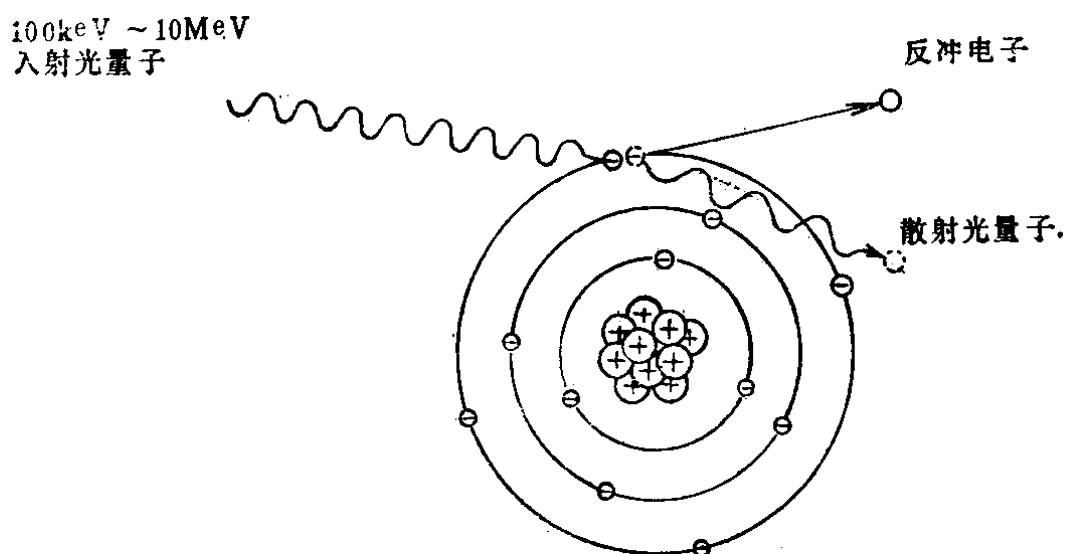


图1-3 康-吴散射

### 三、电子对的生成

当能量高于 $1.02\text{MeV}$ 的光量子与物质作用时，还可能发生电子对生成效应。这时入射光量子的全部能量被用来产生正、负电子对和它们的动能。

正电子寿命极短，它很快就失去动能而与另一负电子结合并消失，同时放出两个 $0.51\text{MeV}$ 的光量子。当高能光量子辐射到高原子序数的物质时，电子对的生成效应对射线强度的衰减将起主要作用。

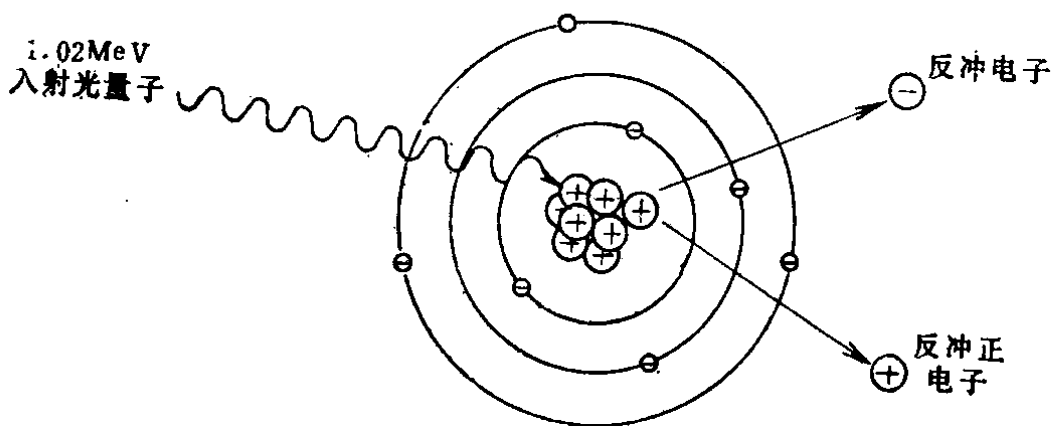


图1-4 电子对的生成

## 第六节 常用术语和单位

### 一、常用术语

#### 1. 放射性

原子核的自发转换，并随之引起本身理化性质的改变现象称放射性。这种变化不受外界任何物理、化学作用的影响。

#### 2. 质量数 $A$

即原子核中质子与中子数的总和。常被标在元素左上角，如 $^{60}\text{Co}$ 与 $^{137}\text{Cs}$ 。

#### 3. 原子序数 $Z$

即标志元素在元素周期表中次序的序号。它也就是该元素原子核中的质子数或核外电子数。

#### 4. 同位素

即原子序数相同而质量数不同的元素，它们在元素周期表上占有同一位置。它们的原子核中有相同质子数，不同中子数。因为它们的核外电子数相同，所以化学性质也基本相同。

### 5. 原子量

即原子相对质量。1961年规定国际原子量以同位素  $^{12}\text{C}$  等于 12.0000 作标准，即以  $^{12}\text{C}$  原子质量的  $\frac{1}{12}$  作原子质量单位，其它元素的原子质量与这质量单位相比就得到该原子的相对质量，也就是原子量。

### 6. 半衰期 $T_{\frac{1}{2}}$

半衰期就是某一元素的原子核经衰变至其原有原子核总数一半所需的时间  $T_{\frac{1}{2}}$ ，按(1-1)式有

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

$$\therefore e^{\lambda T_{\frac{1}{2}}} = 2$$

$$\therefore T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1-3)$$

半衰期随放射源的元素不同而异。

### 7. 平均寿命 $\bar{T}$

平均寿命  $\bar{T}$  就是放射性元素的所有原子核衰变前能存在时间的平均值。

因为在  $dt$  时间内衰变的原子核数  $dN$  能存在  $t$  时间，故其总寿命为  $t dN$ ，按(1-1)式有

$$t dN = t N_0 e^{-\lambda t} \times d(-\lambda t) = -t \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$$

所以原子核衰变前总寿命可计算出为

$$L = \frac{N_0}{\lambda}$$

$$\therefore \bar{T} = \frac{L}{N_0} = \frac{1}{\lambda} \quad (1-4)$$

再按(1,3)式可得出

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda} = 0.693 \bar{T} \quad (1-5)$$

## 8. 放射性活度

放射性同位素的放射性活度乃是它在单位时间内的原子衰变数。

## 9. 放射性比活度

即1g放射性元素的放射性活度。

## 10. 半值厚度 $d_{\frac{1}{2}}$ (或半值层)

使所透过的射线强度减半所需的某物质厚度称为半值厚度或半值层。

## 11. 照射量 $X$

它的定义是  $dQ$  除以  $dm$  所得的商, 其中  $dQ$  是当光量子在质量为  $dm$  的某一体积元内的空气中释放出来的全部电子 (正电子与负电子) 被完全阻止于空气中时, 在空气中形成的一种符号的离子总电荷的绝对值, 即

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

## 12. 克镭当量

它是一种  $\gamma$  放射性单位。

任何  $\gamma$  放射性物质的  $\gamma$  射线在空气等效电离室中所生电离度与 1g 镭和它的衰变产物达到平衡时, 在完全相同情况下所产生的电离度一样, 则此  $\gamma$  放射性物质的放射性就称为 1 克镭当量。

1mg 镭的放射源当它与其衰变物达到平衡时, 所放出的  $\gamma$  射线通过 0.5mm 厚的铂滤片后在空气中距它 1cm 处的照射率为 8.4 R/h。故任何  $\gamma$  放射性物质, 如在离它 1cm 处的照射率为 8.4 R/h, 则其放射性强度也就相当于 1mg 镭当量。

### 13. 剂量 $D$

它是借用医学术语，用来度量射线对物质的作用程度。1962年国际规定，剂量仅用来指吸收剂量，其值为

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

式中  $d\bar{E}$ ——由致电离辐射授与某一体积元中的物质的平均能量；

$dm$ ——该体积元中的物质的质量。

### 14. 剂量当量 $H$

它是生物组织内某点在吸收一定剂量的某种射线后所引起的生物效应的当量，其值为

$$H = D \cdot Q \cdot N \quad (1-6)$$

式中  $D$ ——吸收剂量；

$N$ ——修正系数，对于外照射  $N = 1$ ；

$Q$ ——线质系数，其定义为

$$Q = \frac{\text{产生某一定生物效应的X射线 (200kV) 物理剂量}}{\text{产生同样生物效应的其它射线 物理剂量}}$$

例如对于  $\beta$ 、X与 $\gamma$ 射线的 $Q$ 值为1，而对于快中子与 $\alpha$ 射线的 $Q$ 值则为10。

### 15. 电离常数 $K$

它就是在离开1mCi的 $\gamma$ 射线源1cm处的每小时的照射量为多少伦琴数。

## 二、常用单位

### 1. 贝可 (Bq) 与居里 (Ci)

居里是 $\gamma$ 射线源的放射性活度单位。放射性物质每秒发生 $3.7 \times 10^{10}$ 次原子衰变为1Ci，这数值相当于1g镭每秒的原子衰变数。而在国家法定计量单位中的放射性活度单位为Bq，1Bq即每秒原子衰变1次。

### 2. 伦琴 (R)

1R则是在 1cm<sup>3</sup> 的纯空气 (在760mmHg柱<sup>⊖</sup>压强与 0℃ 下质量为0.001293g重)中电离出的每种离子的绝对值总和为 1e.s.u. 电量所需的 X 射线或γ射线照射量。

∴ 
$$1R = \frac{1e.s.u. \text{电量}}{1cm^3 \text{中空气质量}} = \frac{(3 \times 10^9)^{-1}C}{1.293 \times 10^{-6}kg}$$
$$= 2.58 \times 10^{-4}C/kg$$

其中 C/kg (库仑每千克) 为国家法定计量单位。

3. 拉德 (rad) 与戈瑞 (Gy)

1rad是电离辐射传给每克物质100erg能量的剂量单位。在国家法定计量单位中的 1 戈瑞 (Gy) 则为每千克物质吸收 1 焦耳 (J) 的剂量。

∴ 
$$1rad = 100 \frac{erg}{g} = 100 \times \frac{10^{-7}J}{10^{-3}kg}$$
$$= 10^{-2}J/kg = 10^{-2}Gy$$

4. 雷姆 (rem) 与希沃特 (Sv)

雷姆为剂量当量的单位，它表示人体对各种射线的生物效应的数值。按(1-6)式，如 D 用拉德，则 H 为雷姆。在国家法定计量单位中用希沃特 (Sv)，其量纲为焦耳/千克 (J/kg)。

综合上述射线方面的国家法定计量系统与常用系统间的单位换算关系如表1-1。

表1-1 射线单位换算表

| 概 念       | 常 用 系 统      | 国 家 法 定 计 量 系 统                    |
|-----------|--------------|------------------------------------|
| 放 射 性 活 度 | 1 居里 (Ci)    | $3.7 \times 10^{10}$ 贝可 (Bq)       |
| 照 射 量     | 1 伦琴 (R)     | $2.58 \times 10^{-4}$ 库仑/千克 (C/kg) |
| 剂 量       | 1 拉德 (rad)   | $10^{-2}$ 戈瑞 (J/kg)                |
| 剂 量 当 量   | 1 雷姆 (rem)   | $10^{-2}$ 希沃特 (J/kg)               |
| 照 射 率     | 1 伦琴/秒 (R/S) | $2.58 \times 10^{-4}$ 安培/千克 (A/kg) |

⊖ 1mmHg = 133.322Pa。