

郭洪涛 彭明辰 编著

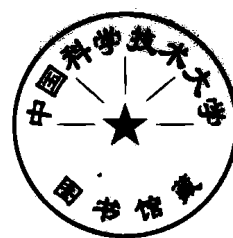
# 电离辐射 剂量学基础



 中国质检出版社

# 电离辐射剂量学基础

郭洪涛 彭明辰 编著



中国质检出版社  
北京

## 图书在版编目(CIP)数据

电离辐射剂量学基础/郭洪涛,彭明辰编著. —北京:中国质检出版社,2011.9

ISBN 978-7-5026-3463-6

I. ①电… II. ①郭… ②彭… III. ①电离辐射—辐射剂量学 IV. ①R144.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 185334 号

## 内 容 提 要

本书共分八章,简明扼要地阐述了核物理基础、电离辐射与物质的相互作用、常用辐射量和单位、电离辐射剂量计算以及放射防护等方面的内容,并结合医用辐射源实际深入浅出地讲解了相关电离辐射剂量学问题。

本书可作为大专院校非核物理专业学生的教学参考书,也可作为从事放射性工作人员的专业工具书。

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100013)

北京市西城区复外三里河北街 16 号(100045)

网址:www.spc.net.cn

电话:(010)64275360 68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

\*

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 327 千字

2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

\*

定价 45.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

# 前 言

电离辐射剂量学主要研究电离辐射的能量在物质中的转移和吸收规律,受照射物质里的辐射剂量分布及其与辐射场的关系,以及在各种电离辐射照射中各类电离辐射量的测量和计算方法等,同时揭示照射剂量与有关生物效应的关系。电离辐射的计量,是计量科学不断发展的新分支。显然,电离辐射与受照物质相互作用的物理量度十分重要,这是利用电离辐射技术,以及放射防护学和放射损伤防治必不可少的重要基础。因而这是一门既有理论意义,又具有应用价值的学科。

1895年11月,伦琴发现了X射线;1896年,贝可勒尔发现了铀的天然放射性;1898年,居里夫妇提炼出钋和镭。这些都是荣获诺贝尔奖的杰出发现,拉开了人类利用电离辐射技术以及开发利用原子能的序幕。正如《简明不列颠百科全书》所记载,X射线的发现“宣布了现代物理学时代的到来,使医学发生了革命”。

20世纪以来,电离辐射技术在各行各业中日益普及,尤其在医学、科研、能源、工业、农业、地质、考古以及国防等各领域发挥了独特作用,建立了丰功伟绩。例如,核科学技术、计算机科学技术、材料科学与生物医学相互渗透并密切交叉融合,开辟了医学影像数字化时代,促进放射学、介入放射学、核医学、放射肿瘤学等不断迅速发展,医用辐射已经成为现代临床医学的突出标志和不可缺少的重要组成部分。而任何行业利用电离辐射技术来造福人类,以及同时加强放射防护以趋利避害,都离不开电离辐射剂量学。

本书就是为适应这种需要而问世的,书中对核物理基础、电离辐射与物质相互作用、电离辐射量与单位、电离辐射剂量计算以及放射防护等方面的内容进行了简明扼要的阐述,尤其是结合医用辐射源实际深入浅出地讲解了相关电离辐射剂量学问题。基础理论和实践经验相结合是本书的特色,期望本书对电离辐射剂量学知识的普及以及电离辐

射技术的发展、应用起到积极的推动作用。

由于编写时间仓促,编者水平有限,书中疏漏和错误之处在所难免,敬请指正。

编 者

2011年4月

# 目 录

<b>第一章 辐射剂量学的基础知识</b> .....	1
第一节 核素、同位素、同质异能素及放射性活度 .....	1
第二节 核衰变与衰变方式 .....	2
<b>第二章 电离辐射常用的辐射量和单位</b> .....	5
第一节 描述辐射场的物理量和单位 .....	5
第二节 吸收剂量及其单位 .....	7
第三节 比释动能及其应用 .....	8
第四节 照射量 .....	16
<b>第三章 电离辐射与物质的相互作用</b> .....	20
第一节 带电粒子与物质的相互作用 .....	20
第二节 X、 $\gamma$ 射线与物质的相互作用 .....	32
第三节 中子与物质的相互作用 .....	41
<b>第四章 外照射剂量的计算</b> .....	45
第一节 $\gamma$ 射线剂量的计算 .....	45
第二节 带电粒子的剂量计算 .....	55
第三节 中子剂量的计算 .....	67
<b>第五章 辐射防护中专用的量和单位</b> .....	69
第一节 术语和定义 .....	69
第二节 剂量当量和剂量当量率 .....	70
第三节 当量剂量 $H_{T,R}$ .....	72
第四节 有效剂量当量 $H_E$ 和有效剂量 $E$ .....	73
第五节 待积剂量当量 $H_{50}$ .....	75

第六节	剂量当量指数 .....	76
第七节	用于外照射防护的四个新量 .....	78
第八节	光子外照射防护监测中实用量的运用 .....	79
第九节	涉及群体的量 .....	81
第十节	与剂量限制体系有关的概念和量 .....	82
<b>第六章</b>	<b>医用辐射源的射线剂量计算 .....</b>	<b>87</b>
第一节	医用辐射源的基本概念 .....	87
第二节	医用诊断 X 射线辐射源 .....	92
第三节	医用外治疗辐射源 .....	102
<b>第七章</b>	<b>射线防护 .....</b>	<b>136</b>
第一节	外照射防护的一般方法 .....	136
第二节	$\gamma$ 射线在物质中的减弱规律 .....	137
第三节	$\gamma$ 点源的屏蔽计算 .....	148
第四节	X 射线的防护 .....	160
第五节	$\beta$ 射线的防护 .....	179
第六节	重带电粒子的防护 .....	185
<b>第八章</b>	<b>电离辐射计量术语及定义 .....</b>	<b>192</b>
第一节	一般名词和辐射量 .....	192
第二节	测量仪器和探测器 .....	199
第三节	测量方法、测量仪器特性参数和其他名词 .....	204
第四节	医学测量仪器特性参数和名词术语 .....	209
<b>附录</b>	<b>中华人民共和国法定计量单位 .....</b>	<b>214</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>217</b>

# 第一章 辐射剂量学的基础知识

## 第一节 核素、同位素、同质异能素及放射性活度

### 一、原子与原子核

原子是元素的最基本单位,由原子核和核外电子组成。原子核由质子(P)和中子(N)组成。

原子的表示符号: ${}^A_Z X$

其中 X——各种元素的符号;

A——核素的原子质量数,核内的质子数及中子数之和;

Z——核素的原子序数,等于核内的质子数。

例: ${}^{125}_{53}\text{I}$ ,  ${}^{131}_{53}\text{I}$ ,  ${}^3_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$  可简化  ${}^{125}\text{I}$ ,  ${}^{131}\text{I}$ ,  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^2\text{H}$ 。

### 二、核素

凡具有特定的质量数、原子序数和核能态,而且平均寿命长得足以被观察的一类原子称为一种核素。

核素是指核内具有特定数目的中子和质子并具有同一能态的一类原子。核素一般分为放射性核素和稳定性核素。

放射性核素: ${}^{90}\text{Sr}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$

非放射性核素(稳定性核素): ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$

$Z > 83$  均为放射性核素。

### 三、同位素

同位素是指原子核内具有相同的质子数和不同的中子数的那些核素,它们在元素周期表中处于同一位置。

在已知的 2 000 多种核素中,稳定性核素仅有 274 种。

质子数与中子数的比例有密切关系:

$$Z < 20 \quad N/Z \approx 1$$



例如,氢的同位素包括 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 及 ${}^3_1\text{H}$ 三种核素。

核素和同位素是两个不同的术语,切勿混为一谈。例如, ${}^3_1\text{H}$ 是放射性核素,而不应称它为“放射性同位素 ${}^3_1\text{H}$ ”。

#### 四、同质异能素

同质异能素是具有相同质量数和原子序数,而处于不同核能态的一类核素。

为表示某核素的内同质异能素,常在核素符号的左上角质量数后面加“m”表示。例如, ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 和 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 两者的能级不同,前者处于激发态,后者处于基态。

#### 五、放射性活度

放射性活度是表征放射性核素特征的一个物理量。

定义:在给定时刻,处于待定能态的一定量放射性核素在  $dt$  时间内发生自发核跃迁数的期望值  $dN$  除以  $dt$ ,即为放射性核素的强度  $A$ :

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (1-1)$$

单位名称为贝可[勒尔],符号为 Bq,  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ 。

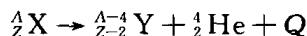
## 第二节 核衰变与衰变方式

一种核素自发地放出射线转变为另一种核素的现象称为核衰变。常见衰变方式有  $\alpha$  衰变、 $\beta$  衰变和  $\gamma$  衰变。

### 一、 $\alpha$ 衰变

放射性核素的原子核放出  $\alpha$  粒子而变成另一种核素的过程称为  $\alpha$  衰变。

一次  $\alpha$  衰变后,母核失去两个质子和两个中子组成一个氦原子核( ${}^4_2\text{He}$ ),故子核原子序数减少 2,质子数减少 4,并伴有 X 射线衰变,反应式为



如:  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He} + 4.937 \text{ MeV}$

$\alpha$  粒子是带正电荷的粒子流,其能量都是固定值,且不连续,是单能线谱。 $\alpha$  粒子的速度约为光速的 1/10 左右,空气中射程很短,穿透力弱,电离能力强。

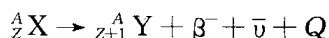
### 二、 $\beta$ 衰变

原子核放射  $\beta$  粒子或俘获轨道电子的放射性衰变称为  $\beta$  衰变。原子序数增加或减少不改变其质量数。

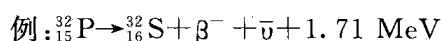
$\beta$  衰变有三种方式,即  $\beta^-$  衰变、 $\beta^+$  衰变和电子俘获。

### 1. $\beta^-$ 衰变

原子核内中子偏多时造成核内不平衡,导致核内一个中子转变成为质子同时释放一个负电子及一个反中微子的过程称为  $\beta^-$  衰变。衰变后子核的原子序数增加 1,质量数不变,衰变反应式为



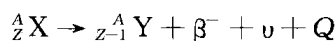
式中,  $\bar{\nu}$  代表反中微子,比电子的质量还小得多(仅为电子 5/1 000)的中性基本粒子,穿透性极强,一般探测器不能探测到。



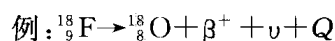
$\beta^-$  粒子能量分布可以从零到一个最大值,形成一个连续能谱。 $\beta^-$  比  $\alpha$  粒子穿透强,在空气中的射程约在数米以内,电离能力比  $\alpha$  粒子弱,比  $\gamma$  射线强。

### 2. $\beta^+$ 衰变

原子核内中子相对不足时,一个质子变为一个中子,同时核内释放出一个正电子及一个中微子的过程称为  $\beta^+$  衰变。衰变后核的原子序数减少 1,质量数不变,衰变反应式为



式中,  $\nu$  为穿透性极强、质量极小的中性基本粒子中微子。

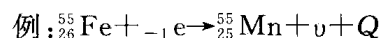
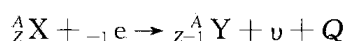


$\beta^+$  粒子的能谱是连续的。

天然不存在核素发生  $\beta^+$  衰变,只有人工放射性核素衰变时才会发生。

### 3. 电子俘获

中子数目相对不足的核素衰变时,原子核先从核外较内层的电子轨道俘获一个电子,使核内一个质子变为中子,同时放射出  $\gamma$  射线和一个中微子的过程。故子核也是原子序数减少 1,质量数不变,衰变反应式为



由于原子核从核外较内层的 K 层俘获电子的几率最高,因而常称其 K 俘获。

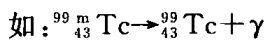
电子俘获时核外电子层缺少一个电子,留下一个空位,外层电子向内层补充,同时将多余的能量以 X 线形成辐射出来,称为标识 X 射线。有时多余的能量也可不以标识 X 射线的形式释出,而是传递到另一壳层电子,使之脱离轨道束缚成为自由电子,称其为俄歇电子。

## 三、 $\gamma$ 衰变

上述四种衰变的子核可能先处于激发态,在退回到基态时以  $\gamma$  光子的形式释放出多余能量,此过程称为  $\gamma$  衰变或  $\gamma$  跃迁。

大多数有  $\gamma$  跃迁的核素,子体处于激发态的时间都极短,约为(10~13)s,所以  $\gamma$  跃迁常看作是与母体衰变同时发生的。有些核素子体处于激发态的时间较长,可以单独测出半衰期,这种子核被看作是一种单独的核素。

这种通过  $\gamma$  跃迁衰变成原子序数和质量数与母核相同,只是能级不同的子核的一种同质异能素之间的变化,称为同质异能跃迁。



#### 四、核衰变规律

各种放射性核素其总放射性核的数目( $N$ )都随时间( $t$ )按指数规律衰减,即

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

式中,负号表示母体核素随时间的增长而减少。 $\lambda$  为衰变常数,其含义是某种放射性核素的一个核在单位时间内进行自发衰变的几率,即  $\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$ ,它是一个恒定值:

$$\int_{N_0}^{N_t} \frac{1}{N} dN = \int_{t_0}^t -\lambda dt$$

解得

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

式中, $N_0$  为放射性核素初始时的核素, $N$  为经过  $t$  时间衰变后剩余的核素。

## 第二章 电离辐射常用的辐射量和单位

辐射量和单位是为描述辐射场辐射作用于物质时的能量传递及受照物内部变化的程度和规律而建立起来的物理量及其量度。

辐射量是一种能表述特定辐射的特征并能够加以测定的量。

### 第一节 描述辐射场的物理量和单位

电离辐射存在的空间称为辐射场,辐射场是由辐射源产生的。

辐射源包括  $\gamma$  源、中子源、 $\beta$  源等,与它们相应的辐射场称为  $\gamma$  辐射场、中子辐射场及  $\beta$  辐射场。

存在两种或两种以上的电离辐射场称为混合辐射场,例如,中子- $\gamma$  混合场, $\beta$ - $\gamma$  混合场等。

#### 一、粒子注量 $\Phi$ particle fluence

定义:在空间一给定点处射入以该点为中心的小球体的粒子数  $dN$  除以该球体的截面积  $da$ 。粒子注量分定向辐射场与非定向辐射场。

粒子定向辐射场中,粒子注量可用垂直粒子运动方向,单位面积上所通过的粒子数来表示。

如果平面  $da$  的法线与射线束不平行,如图 2-1(a)所示,则单位面积所截的粒子数与射线束方向和其平面法线夹角余弦的绝对值成正比。当该夹角  $\theta$  为零时,便是垂直于粒子运动方向的情况。

如果辐射场内粒子运动方向是非定向的,杂乱无章的,如图 2-1(b)所示,用上述定向场中的粒子注量概念难以描述非定向辐射束的情况。为此,ICUR 引入注量的概念:辐射场中某一点的注量,是进入以该点为球心,截面积为  $da$  的小球体内的粒子数  $dN$  除以  $da$  而得的商,即

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (2-1)$$

式中  $da$ ——小球体的截面积,  $m^2$ ;

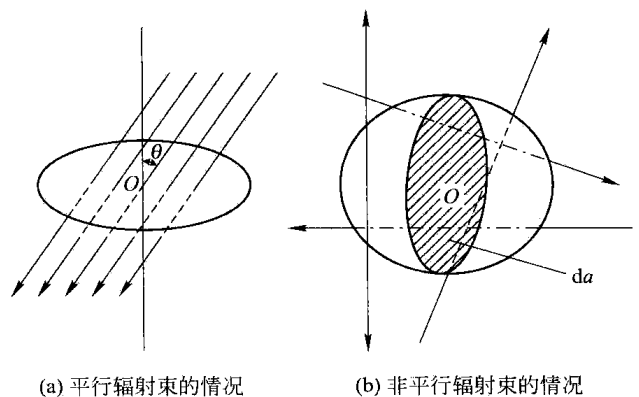


图 2-1 表述粒子注量概念的示意图

$dN$ ——进入小球体的粒子数(不包括从小球体内流出的粒子数);

$\Phi$ ——粒子注量,  $m^{-2}$ 。

由于小球体内的截面积可任意选取,对无论任何方向入射到小球体上的粒子,都可选取相应的截面积。因此 ICRU 定义的粒子注量既适用于定向辐射场,也适用于非定向辐射场。粒子注量与粒子的入射方向无关。

一般情况下,通过单位截面积的粒子数不等于粒子的注量,而是小于粒子的注量,只有在粒子单向平行垂直入射的特殊情况下才等于粒子注量。

若粒子能量具有谱分布, $\Phi(E)$ 表示能量为  $0 \sim E$  之间的粒子注量。注量对粒子能量  $E$  的微分分布为  $\Phi(E)$  对  $E$  的导数

$$\Phi_E = \frac{d\Phi(E)}{dE} \quad (2-2)$$

能量为  $E \sim E + dE$  之间的粒子注量,可表示为

$$\Phi_{E, \Delta E} = \frac{d\Phi(E)}{dE} dE \quad (2-3)$$

将上式对全粒子能谱积分,便得到为  $0 \sim \infty$  范围内的粒子注量:

$$\Phi = \int_0^{\infty} \frac{d\Phi(E)}{dE} dE \quad (2-4)$$

在计算具有谱分布的粒子的吸收剂量和比释动能时,常用式(2-4)。

## 二、粒子注量率 $\varphi$ particle fluence rate

粒子注量率表示单位时间内,进入单位截面积的球体内的粒子数,定义为  $d\Phi$  除以  $dt$  而得的商,即

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2 N}{da \cdot dt} \quad (2-5)$$

式中  $d\Phi$ ——在时间间隔  $dt$  内,进入单位截面积的小球体内的粒子数,即在时间间隔  $dt$  内注量的增量。

$\varphi$ ——注量率,  $m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。

## 三、能注量 $\Psi$ energy fluence

定义:在空间一给定点处,射入以该点中心的小球体的所有粒子的能量  $dE_R$  (不包括静止能量)总和除以该球体的截面积  $da$ ,即

$$\Psi = \frac{dE_R}{da} \quad (2-6)$$

式中  $dE_R$ ——进入截面积为  $da$  的球体内所有粒子的能量之和(扣除静止能量), J;

$\Psi$ ——能注量,  $J/m^2$ 。

在进行比释动能及吸收剂量的计算时,最终要通过粒子注量和粒子能量来计算电离辐射授予与每单位质量受照物质的能量。

对于能量为  $E$  的粒子,  $\Psi$  与  $\Phi$  的关系为

$$\Psi = \Phi E \quad (2-7)$$

当粒子能量具有谱分布时,能量在  $E \sim E + dE$  的粒子微分能注量,由式(2-3)可推得为  $(d\Phi / dE)E \cdot dE$ ,则进入单位截面球体内的粒子能注量为

$$\Psi = \int_0^{\infty} \frac{d\Phi}{dE} E \cdot dE \quad (2-8)$$

当计算具有谱分布的粒子(如中子、 $\beta$ 射线、韧致辐射)的吸收剂量时,常要利用式(2-8)。

#### 四、能注量率 $\psi$ energy fluence rate

单位时间内进入单位截面球体内所有粒子能量之和,称为能注量率。定义为  $d\Psi$  除以  $dt$  而得的商,即

$$\psi = \frac{d\Psi}{dt} \quad (2-9)$$

式中  $d\Psi$ ——在时间间隔  $dt$  内,进入截面积为  $da$  的球体内的所有粒子能量之和,即在时间间隔  $dt$  内注量的增量;

$\psi$ ——能注量率,  $J/m^2 \cdot s$ 。

对于能量为  $E$  原粒子,能注量率  $\psi$  与粒子注量率  $\varphi$  的关系为

$$\psi = \varphi E \quad (2-10)$$

对于具有谱分布的粒子,可用式(2-8)原理计算  $\psi$ 。

**【例题】** 设在3分钟内,测得能量为4 MeV中子注量为  $10^{12}$  中子/ $m^2$ ,求  $\Psi$  和  $\psi$ 。

**解:**  $\Phi = 10^{12}$  中子/ $m^2$ ,  $E = 4$  MeV,  $1$  MeV =  $1.6 \times 10^{-13}$  J, 则

$$\begin{aligned} \Psi &= 10^{12} \times 4 \times 1.6 \times 10^{-13} \\ &= 0.64 \text{ J/m}^2 \end{aligned}$$

$$\psi = 0.64 / 3 \times 60 = 3.6 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2 \cdot s$$

## 第二节 吸收剂量及其单位

“剂量”一词本是医学上的专用术语,表示用药物治疗疾病或确定药物毒性时需要掌握的用剂量。它与电离辐射的量本是两个不同的概念。自从发现了X射线及镭治疗疾病以及防护的需要,迫切要求对X或 $\gamma$ 射线的量建立一个统一的量度单位。1937年在芝加哥召开的ICRU会议确定:X射线的“量”或剂量的国际单位称作“伦琴”,用“R”表示。

这次会议把以伦琴为单位的X射线的量称作剂量。以后,人们把剂量作为X或 $\gamma$ 射线的量沿用下来,并扩展到 $\alpha$ 、 $\beta$ 及中子等电离辐射。这便是辐射剂量学中这一概念的由来。

从1962年以来,所谓“剂量”,实际上指的是吸收剂量。

### 一、吸收剂量 $D$ absorbed dose

定义:任何电离辐射,授予质量为  $dm$  的物质的平均能量  $d\bar{\epsilon}$  除以  $dm$ 。

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (2-11)$$

式中  $d\bar{\epsilon}$ ——平均能量, J。

吸收剂量的 SI 单位为焦耳每千克(J/kg), 单位的专门名称为戈[瑞], 符号为 Gy, 1 戈 = 1 焦耳/千克(1 Gy = 1 J/kg)。

1 戈 =  $10^3$  毫戈(mGy) =  $10^6$  微戈( $\mu$ Gy)。

旧的专用单位为拉德(rad), 1 拉德 =  $10^{-2}$  戈(1 rad =  $10^{-2}$  Gy)。

实验证明, 致电离粒子与物质的原子核或核外电子发生的相互作用是单个的、不连续的、随机的。通过观察, 我们发现致电离粒子击中小体积内的物质质量是随机的, 其中能量沉积的数值是服从统计涨落的, 因此, 描述这种能量沉积的量是随机的。

吸收剂量、粒子注量等物理量是非随机量。非随机量不服从统计分布, 对于给定的条件, 原则上可以计算出它的值。

对于各种类型的辐射, 任何介质, 内照射和外照射都适用。

吸收剂量总是指某一介质中某一点而言的, 所以必须指明介质的种类和所在的位置。

## 二、吸收剂量率 $\dot{D}$ absorbed dose rate

定义: 在  $dt$  时间内吸收剂量的增量  $dD$  除以  $dt$ , 即

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (2-12)$$

吸收剂量率的 SI 单位为焦耳每千克秒(J/kg · s), 单位的专门名称为戈[瑞]每秒(Gy/s), 1 戈/秒 = 1 焦耳/千克 · 秒(1 Gy/s = 1 J/kg · s)。

吸收剂量率的单位也可用戈/小时、毫戈/小时、微戈/小时等。

旧的专用单位为拉德/秒、毫拉德/小时、微拉德/小时。

## 第三节 比释动能及其应用

间接电离粒子在物质中的能量沉积过程分为两个步骤: 第一步是间接电离粒子把能量转移给带电粒子; 第二步是带电粒子通过电离、激发等把能量沉积在物质中。因此, 量度间接电离粒子传递给物质的能量, 需要量度它给与直接电离粒子的能量。比释动能就是描述间接电离粒子与物质相互作用时, 把多少能量传递给了直接电离粒子的物理量, 而吸收剂量则表示了第二步骤的结果。比释动能和吸收剂量存在着一定的关系。

### 一、比释动能 $K$ kerma

定义: 不带电电离粒子, 在质量为  $dm$  的某种物质中释放出来的全部带电粒子的初始动能总和  $dE_{tr}$  除以  $dm$ , 即

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (2-13)$$

式中  $dE_{tr}$ ——不带电粒子在特定物质的体积元内,释放出来的所有带电粒子的初始动能的总和(包括这些带电粒子在韧致辐射过程中放出的能量,以及在这一体积元内发生的次级过程中产生的任何带电粒子的能量,也包括俄歇电子的能量在内),J;

$dm$ ——所考虑的体积元内物质的质量,kg;

$K$ ——比释动能,Gy。

$$1 \text{ 戈} = 1 \text{ 焦耳/千克} \quad (1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg})$$

## 二、比释动能率 $\dot{K}$ kerma rate

定义:在  $dt$  时间内比释动能的增量  $dK$  除以  $dt$ ,即

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} \quad (2-14)$$

比释动能率的 SI 单位为戈[瑞]每秒或其倍数或其分倍数除以适当的时间单位而得的商,如戈/秒(Gy/s)、戈/小时(Gy/h)、毫戈/小时(mGy/h)、微戈/小时( $\mu$ Gy/h)等。

## 三、比释动能与注量的关系

对于一定能量的单能辐射,能注量  $\Psi$  和比释动能  $K$  有如下关系:

$$K = \Psi \frac{\mu_{tr}}{\rho} \quad (2-15)$$

将式(2-7)代入式(2-15),得比释动能  $K$  与粒子注量  $\Phi$  的基本关系式:

$$K = \Phi \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) E \quad (2-16)$$

式中  $E$ ——入射粒子能量,J( $1 \text{ MeV} \approx 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$ );

$\Phi$ ——粒子注量,粒子/ $\text{m}^2$ ;

$\frac{\mu_{tr}}{\rho}$ ——一定物质对特定能量的间接致电离粒子的质能转移系数, $\text{m}^2/\text{kg}$ 。

对于具有谱分布的入射粒子,若  $\Phi(E)$  表示其能量在  $0 \sim E$  之间的粒子注量,则由能量在  $E \sim E+dE$  的微分能注量,推得微分比释动能为

$$dK = \frac{d\Phi(E)}{dE} \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) E \cdot dE \quad (2-17)$$

对粒子全能谱范围  $0 \sim E_0$  积分,可得到具有谱分布的粒子的比释动能为

$$K = \int_0^{E_0} \frac{d\Phi(E)}{dE} \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) E \cdot dE \quad (2-18)$$

式(2-17)和式(2-18)是计算单能及具有谱分布的间接电离粒子的比释动能的通用公式。

为了使用方便,引入每单位中子注量的比释动能值  $\kappa_f$ 。 $\kappa_f$  又称比释动能因子, $\kappa_f = E \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)$ 。对于单能中子,只要知道  $\Phi$  和中子能量  $E$  的值,可以查出相应材料中的比释动能

因子来计算。对于具有谱分布中子,如果中子谱已知,也可用比释动能因子  $\kappa_f = E \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)$  对整



个谱的平均值计算(见中子剂量的计算)。表 2-1 列出了比释动能及有关量的单位。

表 2-1 比释动能及有关量的单位

名称	符号	单位		换算关系式
		国际单位制	厘米·克·秒制	
比释动能	$K$	焦耳·千克 <sup>-1</sup>	尔格·克 <sup>-1</sup>	1 焦耳·千克 <sup>-1</sup> = 10 <sup>7</sup> 尔格·克 <sup>-1</sup>
注量	$\Phi$	米 <sup>-2</sup>	厘米 <sup>-2</sup>	1 米 <sup>-2</sup> = 10 <sup>-4</sup> 厘米 <sup>-2</sup>
质能转移系数	$\mu_{tr}/\rho$	米 <sup>2</sup> ·千克 <sup>-1</sup>	厘米 <sup>2</sup> ·克 <sup>-1</sup>	1 米 <sup>2</sup> ·千克 <sup>-1</sup> = 10 厘米 <sup>2</sup> ·克 <sup>-1</sup>
能量	$E$	焦耳	尔格	1 焦耳 = 10 <sup>7</sup> 尔格 1 兆电子伏 = 1.60 × 10 <sup>-13</sup> 焦耳 = 1.60 × 10 <sup>-6</sup> 尔格
每单位注量的比释动能 (比释动能因子)	$\kappa_f = K/\Phi = K/\Phi_0$ 或 $E(\mu_{tr}/\rho)$	焦耳·米 <sup>2</sup> ·千克 <sup>-1</sup> (戈·米)	尔格·厘米 <sup>2</sup> ·克 <sup>-1</sup> (拉德·厘米 <sup>2</sup> )	1 焦耳·米 <sup>2</sup> ·千克 <sup>-1</sup> = 10 <sup>8</sup> 尔格·厘米 <sup>2</sup> ·克 <sup>-1</sup>

**【例题】** 已知能量为 14.5 MeV 的中子注量  $\Phi = 1.5 \times 10^{11}$  中子/m<sup>2</sup>, 求中子在参考人中的比释动能  $K$ 。

解:  $\Phi = 1.5 \times 10^{11}$  中子/m<sup>2</sup> = 1.5 × 10<sup>11</sup> 中子/cm<sup>2</sup>, 附表查出  $\kappa_f = 0.659 \times 10^{-8}$  rad·cm<sup>2</sup>, 代入下式得

$$\begin{aligned} K &= \Phi \kappa_f \\ &= 1.5 \times 10^7 \times 0.659 \times 10^{-8} \\ &= 0.099 \text{ rad} \\ &= 1.0 \times 10 \text{ Gy} \end{aligned}$$

#### 四、比释动能与吸收剂量的关系

间接电离粒子(如 X、 $\gamma$  和中子)在与物质相互作用的过程中, 传递给单位质量的物质的能量, 只有在带电粒子平衡的条件下, 才近似等于单位质量的物质实际吸收的能量。带电粒子平衡的概念在辐射剂量学中有着重要的应用。

##### 1. 带电粒子平衡

间接电离辐射传递给小体积元  $\Delta V$  的能量, 等于它在  $\Delta V$  内产生的次级带电粒子动能的总和。次级带电粒子有的产生在  $\Delta V$  内, 有的产生在  $\Delta V$  外。在  $\Delta V$  内产生的带电粒子, 有些跑出该体积元(如 a), 但有些带电粒子产生于  $\Delta V$  外, 而进入该体积元(如 b)。当进入该体积元的带电粒子和离开该体积元的带电粒子的总能量和谱分布达到平衡时, 就称  $P$  点存在着带电粒子平衡, 如图 2-2 所示。

物质中的一点, 在电离辐射的照射下, 如果满足下列条件, 则此点存在着带电粒子平衡:

(1) 由小体积  $\Delta V$  向各个方向伸展的距离  $d$  至少大于由初级辐射所产生的次级带电粒子的最大射程  $R_{\max}$ 。在  $d \geq R_{\max}$  的区域内, 辐射的强度和能谱恒定不变。

(2) 在上述同样的区域内, 介质对次级带电粒子的阻止本领及对初级辐射的质能吸收