

核武器辐射防护 技术基础

(第2版)



尚爱国◎等编著



西北工业大学出版社

核武器辐射防护技术基础

(第2版)

尚爱国 过惠平 秦 晋 吕 宁 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】核辐射防护及环境保护作为核科学技术学科领域的重要分支,近年来有了快速发展,新的思想和技术不断涌现。本书是基于适应学科发展和人才培养的需要而编写的。全书共9章,介绍了电离辐射剂量学和辐射防护的基本物理量、电离辐射致生物效应的基本原理、电离辐射防护与辐射源安全法规标准等内容。

本书可作为“核武器辐射防护技术基础”的教材,也可作为从事核武器辐射防护、核安全、环境放射性监测、放射卫生防护等工作人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

核武器辐射防护技术基础/尚爱国等编著. —2版. —西安:西北工业大学出版社,2016.3
ISBN 978-7-5612-4745-7

I. ①核… II. ①尚… III. ①核武器—辐射防护 IV. ①TJ91②R827.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 043152 号

出版发行:西北工业大学出版社
通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072
电 话:(029)88493844 88491757
网 址:www.nwpup.com
印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司
开 本:787 mm×1 092 mm 1/16
印 张:20.375
字 数:499 千字
版 次:2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷
定 价:55.00 元

第 2 版前言

核辐射防护及环境保护是核科学技术学科领域的重要分支。辐射防护是人类在利用电离辐射、放射性物质以及核能的过程中产生和发展起来的。辐射防护的任务是保护环境、保障从事放射性工作人员的健康和安全,保护广大公众的健康和安全,促进核科学技术的发展。辐射防护的目的是防止有害的确定性效应,限制随机性效应发生率并使之达到被认为可以接受的水平。

核科学技术的军事应用领域,包括了核武器和核潜艇等高新技术和装备;在核武器的管理使用中,为保护工作人员、保护环境,促进核武器管理发展,核武器的辐射防护就成为核武器管理工作中的一项重要内容。

编者长期从事核武器辐射防护领域的教学工作,深深感到,一方面核辐射防护作为一门多学科综合的前沿学科,近年来随着核科学技术的快速发展而取得了大量成果,新的思想、出版物和新的技术装备不断出现;另一方面,在教学实践中又缺乏新的教材以适应学科发展和人才培养需要。基于此考虑,在学习总结前人成果的基础上,2009 年根据需要编著本书。根据近年核安全管理和核辐射防护技术的发展,2015 年对第 1 版教材内容进行修订补充,形成第 2 版。教材主要供院校进行核武器辐射防护技术基础教学工作,也可供从事核武器辐射防护、核安全、环境放射性监测、放射卫生防护等工作的人员参考。

本书内容共分九章,第 1 章电离辐射剂量学和辐射防护的基本物理量,第 2 章电离辐射致生物效应的基本原理,第 3 章电离辐射防护与辐射源安全法规标准,第 4 章铀、钚、钍的基本特性,第 5 章外照射剂量计算和防护方法,第 6 章内照射剂量计算和防护方法,第 7 章辐射剂量测量原理和方法,第 8 章辐射监测要求与辐射安全管理,第 9 章放射性三废处理与处置概述。

本书第 2 版修订由火箭军工程大学尚爱国教授主编,参加人员有火箭军工程大学过惠平教授、秦晋讲师、吕宁讲师和宋久江硕士研究生。编写过程中得到火箭军工程大学各级首长机关大力支持和关心,他们对本书第 2 版出版的热情支持,在此表示最诚挚致谢!同时,本书也是在总结参考本领域前辈编著教材及其他文献资料的基础上进行的工作,因此对本书参考文献列出的所有原作者和单位表示衷心的感谢!

限于水平,书中定存种种错误与不妥之处,敬请读者提出宝贵批评和建议。

编著者

2016 年 1 月于西安

目 录

第 1 章 电离辐射剂量学和辐射防护的基本物理量	1
1.1 描述辐射场的物理量	1
1.2 相互作用系数	4
1.3 电离辐射剂量学常用的物理量	8
1.4 辐射防护常用的物理量	22
复习题	40
第 2 章 电离辐射致生物效应的基本原理	41
2.1 电离辐射致生物效应的主要特点	41
2.2 电离辐射的原初作用	42
2.3 电离辐射对 DNA、细胞的作用以及辐射致突致癌的机理	43
2.4 电离辐射致生物效应的分类与影响辐射生物效应的因素	54
2.5 几种不同照射条件下电离辐射致生物效应的特点	57
2.6 我国天然辐射剂量水平和各类照射的剂量水平	68
复习题	76
第 3 章 电离辐射防护与辐射源安全法规标准	77
3.1 电离辐射防护与辐射源安全法规标准的发展	77
3.2 我国电离辐射防护和辐射源安全基本标准简介	87
复习题	97
第 4 章 铀、钍、钚的基本特性	98
4.1 铀的基本物理性质、化学性质和放射毒理特性	98
4.2 钍的基本物理性质、化学性质和放射毒理特性	110
4.3 钚的基本物理性质、化学性质和放射毒理特性	123
复习题	134
第 5 章 外照射剂量计算和防护方法	136
5.1 外照射剂量计算方法	136
5.2 γ 射线外照射防护一般方法和 γ 点源屏蔽计算	156
5.3 β 射线外照射防护的特点和 β 射线屏蔽计算	175
5.4 中子的屏蔽计算	178
复习题	179

第 6 章 内照射剂量计算和防护方法	180
6.1 概述	180
6.2 内照射剂量计算涉及的基本概念和辐射量	182
6.3 由放射性摄入量估算内照射剂量的方法	196
6.4 氡内照射剂量计算方法与尿氡监测模式对摄入量计算的影响	214
6.5 内照射防护的一般原则和基本措施	217
复习题	219
第 7 章 辐射剂量测量原理和方法	220
7.1 电离室测量照射量或吸收剂量的基本原理	220
7.2 β 射线和电子束吸收剂量的测量	228
7.3 测量 γ 射线和电子吸收剂量的量热计法	232
7.4 热释光个人剂量计测量个人剂量原理	237
7.5 剂量测量中的化学剂量计	247
7.6 电离辐射剂量仪器仪表的计量检定	248
7.7 中子剂量的测量	275
复习题	281
第 8 章 辐射监测要求与辐射安全管理	282
8.1 辐射防护监测分类、目的和方法	282
8.2 表面放射性污染与去污	289
8.3 核武器辐射防护的具体要求	293
8.4 核武器易裂变材料核临界安全要求	295
8.5 放射工作人员的健康管理	298
8.6 辐射防护技术人员基本要求	300
复习题	302
第 9 章 放射性三废处理与处置概述	303
9.1 放射性三废概述	303
9.2 放射性废水的处理	304
9.3 放射性废气的处理	307
9.4 放射性固体废物的处理	308
复习题	310
附录 ICRP 出版物目录	311
参考文献	318

第 1 章 电离辐射剂量学和辐射防护的基本物理量

电离辐射是一种具有可使受作用介质发生电离、激发的高速微观粒子。在研究电离辐射本身的性质或研究电离辐射与物质相互作用问题的过程中,要解决的问题之一便是如何度量电离辐射。由于电离辐射通过与物质的相互作用,把动量、能量传递给受照射物质并在受照物质内部导致物理变化、化学变化和生物变化等,因而受照射物质内部的各种变化及程度就构成了度量辐射和辐射效应的基础。

电离辐射剂量学和辐射防护领域的物理量(也称辐射量,以下不作区别)是描述辐射场、辐射与物质相互作用以及度量受照物内部变化程度和变化规律的物理量。目前,国际上辐射量及其单位主要由国际辐射单位与测量委员会(ICRU)和国际放射防护委员会(ICRP)定义和阐述,并应用于相关领域。我国国家标准《量和单位——核反应和电离辐射的量和单位》(GB3102.10—1993)对在我国电离辐射领域适用的量和单位做了明确规定。

本章主要介绍电离辐射剂量学和辐射防护领域应用的基本物理量。基本物理量按其特性分为描述辐射场的物理量、相互作用系数、电离辐射剂量学的物理量和辐射防护的物理量等 4 类。需要注意的是,由于电离辐射本身特性以及与物质相互作用的复杂性,用于描述电离辐射的量在历史上经历了许多变化。今后随着科学技术的发展、测量技术的提高以及实际应用的要求,这些量的概念及定义也会进一步完善和发展,因此,在学习掌握这些基本物理量的同时,可以学习有关 ICRP 和 ICRU 的报告,以便了解基本辐射量的发展历史,更好地理解基本辐射量的本质含义。

1.1 描述辐射场的物理量

辐射场是指电离辐射所存在的空间。辐射场可以根据不同的分类方法进行分类,如按照构成辐射场的辐射种类进行分类等。本节主要介绍粒子注量、粒子注量率、能注量、能注量率这 4 个用于描述辐射场特性的物理量及它们的关系。

1.1.1 粒子注量 Φ

定义:辐射场中在空间一给定点处的粒子注量(Particle Fluence)是射入以该点为中心的小球体的粒子数 dN 除以该球体截面积 da 的商(见图 1.1),即

$$\Phi = \frac{dN}{da} \tag{1.1}$$

式中, da 为所定义小球体的截面积, m^2 ; dN 为进入截面积为 da 的小球体内的粒子数,无量纲; Φ 为粒子注量, m^{-2} 。

说明:

(1) 定义的小球体内的截面积方向可任意选取,其实际是通过球心的最大截面积。对于

无论从任何方向入射到小球内的粒子,都可以取出相应的截面积,因此,粒子注量的特性之一是注量与粒子的入射方向无关。之所以定义一个小球体并使注量与粒子的入射方向无关的主要原因是电离辐射剂量学和辐射防护领域关心的是辐射作用于某一点所产生的效应,而不管粒子的入射方向。

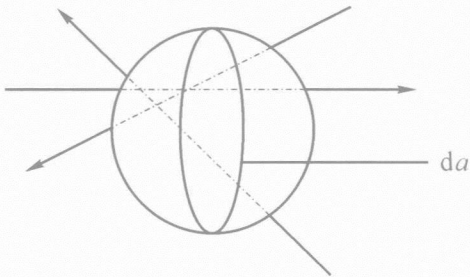


图 1.1 粒子注量定义示意图

(2) 上述定义的粒子注量所关心的是进入截面积为 da 的小球体内的粒子数,而实际上辐射场空间某点的粒子注量,也可定义为多个自变量参数的函数。如将辐射场空间某点的粒子注量定义为空间位置 (x,y,z) 、粒子能量 (E) 、入射方向 (θ, φ) 、时间 (t) 的函数,即 $\Phi = \Phi(x,y,z,E,\theta,\varphi,t)$ 。在某些特定情况下可建立上述定量的函数关系,但大多数情况下是无法建立直接定量的函数关系。

(3) 粒子注量的数学定义采用了微分的形式,这是为了定义的严谨性以确保辐射场空间某点的粒子注量数值的唯一性和确定性。但在实际中,如利用测量仪器测量空间某点的粒子注量其测量结果是测量仪器有效探测体积内各点粒子注量的平均值,这一平均值与所要求测量点的粒子注量的真值的差别,取决于辐射场的均匀程度和测量仪器的大小等特性。

(4) 粒子注量的微分分布和积分分布。如果辐射场由各种能量的粒子组成,即粒子是非单能的且按能量具有谱分布,根据上述说明则可以定义一个粒子注量的能量微分分布,以全面了解辐射场中各点粒子注量随粒子能量的分布情况。

1) 粒子注量的微分分布:若用 $\Phi(E)$ 表示能量为 $0 \sim E$ 之间的粒子注量,则粒子注量对粒子能量 E 的微分分布为 $\Phi(E)$ 对 E 的导数,即

$$\Phi_E = \frac{d\Phi(E)}{dE} \tag{1.2}$$

能量为 $E \sim E + dE$ 之间的粒子注量,可表示为

$$\Phi_{E,\Delta E} = \Phi_E dE = \frac{d\Phi(E)}{dE} \cdot dE \tag{1.3}$$

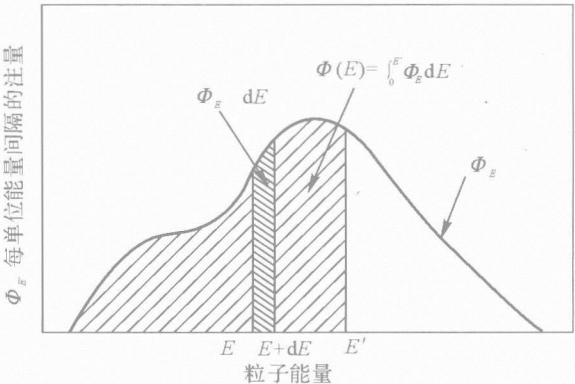


图 1.2 粒子注量的微分分布和积分分布关系

2) 粒子注量的积分分布:利用粒子注量的微分分布,对粒子注量微分分布进行能量从 $0 \sim E'$ 的积分,可得辐射场中某点能量从 $0 \sim E'$ 的粒子注量(见图 1.2),其关系式为

$$\Phi(E) = \int_0^{E'} \Phi_E dE \quad (1.4)$$

1.1.2 粒子注量率 φ

定义:粒子注量率(Particle Fluence Rate)为 $d\Phi$ 除以 dt 而得的商。它表示单位时间内进入单位截面积的小球体内的粒子数,即

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2 N}{da dt} \quad (1.5)$$

式中, $d\Phi$ 为时间间隔 dt 内,进入单位截面积的小球体内的粒子数, m^{-2} ; da 为所定义小球体的截面积, m^2 ; dt 为时间间隔, s ; φ 为粒子注量率, $m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。

说明:

(1) 粒子注量率的时间积分等于粒子注量。定义的粒子注量率,对于被考察的实体而言,粒子一词可用更明确的术语代替,例如中子注量率、质子注量率等。粒子注量率又称为粒子通量密度(Particle Flux Density)。

(2) 对于辐射场由各种能量的粒子组成,即粒子是非单能的且按能量具有谱分布的情况下,可以定义一个粒子注量率的微分分布,以全面了解辐射场中各点粒子注量率随粒子能量的分布情况。若用 φ_E 表示粒子注量率的微分分布,则粒子注量率与粒子注量率微分分布的关系为

$$\varphi = \int_0^{\infty} \varphi_E dE \quad (1.6)$$

1.1.3 能注量 Ψ

定义:在辐射场中空间一给定点处的能注量(Energy Fluence)是射入以该点为中心的小球体的所有粒子的能量 dE_R (不包括粒子的静止能量) 总和除以该球体的截面积 da 的商,即

$$\Psi = \frac{dE_R}{da} \quad (1.7)$$

式中, dE_R 为进入截面积 da 小球体内所有粒子的能量总和(不包括粒子的静止能量), J ; da 为所定义小球体的截面积, m^2 ; Ψ 为能注量, $J \cdot m^{-2}$ 。

说明:

(1) 能注量也存在按空间位置(x, y, z)、粒子能量(E)、入射方向(θ, φ)、时间(t)的分布,是一个非随机量,其他的特性类似于粒子注量。如对于具有谱分布的辐射场,可定义一个描述能注量的微分分布(Ψ_E),则能注量(Ψ)与能注量微分分布(Ψ_E)的关系为

$$\Psi = \int_0^{\infty} \Psi_E dE \quad (1.8)$$

(2) 能注量是通过辐射场中某点的粒子的能量来表征辐射场的性质,这个量对于计算间接致电离粒子在物质中发生的能量传递以及物质对辐射能量的吸收是非常有用的一个量。特别注意所定义的 dE_R 是进入截面积 da 小球体内所有粒子的能量总和,实际是粒子的动能之和,不包括粒子的静止能量。

1.1.4 粒子能注量率 ψ

定义:粒子能注量率(Particle Fluence Rate)为 $d\Psi$ 除以 dt ,即

$$\phi = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d^2 E_R}{da dt} \quad (1.9)$$

式中, $d\Psi$ 为在时间间隔 dt 内, 进入单位截面积(da) 的小球体内的所有粒子能量之和(不包括粒子静止能量), 即在时间间隔 dt 内能注量的增量, $J \cdot m^{-2}$; da 为所定义小球体的截面积, m^2 ; dt 为时间间隔, s ; ϕ 为粒子注量率, $W \cdot m^{-2}$, $1 W \cdot m^{-2} = 1 J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ 。

说明:

(1) 能注量率的时间积分等于能注量。定义的能注量率, 对于被考察的实体而言, 粒子一词可用更明确的术语代替, 例如中子能注量率, 质子能注量率等。能注量率又称为能通量密度。

(2) 对于辐射场由各种能量的粒子组成, 即粒子是非单能的且按能量具有谱分布的情况下, 可以定义一个能注量率的微分分布, 以全面了解辐射场中各点能注量率随粒子能量的分布情况。若用 ϕ_E 表示粒子能注量率的微分分布, 则能注量率与能注量率微分分布的关系为

$$\phi = \int_0^{\infty} \phi_E dE \quad (1.10)$$

1.1.5 粒子注量与能注量、粒子注量率与粒子能注量率的关系

对于辐射场中粒子能量为 E 时, 粒子注量与能注量、粒子注量率与粒子能注量率的关系分别为

$$\Psi = \Phi E \quad (1.11)$$

$$\phi = \varphi E \quad (1.12)$$

当粒子能量具有谱分布时, 粒子注量与能注量、粒子注量率与粒子能注量率的关系分别为

$$\Psi = \int_0^{\infty} \Phi_E E dE \quad (1.13)$$

$$\phi = \int_0^{\infty} \varphi_E E dE \quad (1.14)$$

式(1.11) 和式(1.12) 或式(1.13) 和式(1.14) 说明, 粒子注量与能注量、粒子注量率与粒子能注量率都是描述辐射场性质的物理量, 只是一个着眼于到达辐射场某点的粒子数, 一个着眼于到达辐射场某点的粒子总能量, 但只要知道辐射场粒子的能量或能量谱分布, 即可通过上式将两者联系起来。积分上限的无穷大符号只代表辐射场粒子能量谱分布中的能量上限。

1.2 相互作用系数

描述辐射场的粒子注量、能注量等量描述了进入辐射场空间某一点的全部粒子数目或全部能量。但这些粒子如何与物质相互作用以及相互作用的程度, 则需要引入本节介绍的相互作用系数进行定量描述。相互作用系数可以定量描述辐射与物质之间相互作用的类型和能量转移的特性。

相互作用系数按辐射与物质之间相互作用性质的不同分为两类系数: 一类是针对间接致电离粒子(如中子, γ , X射线)而言, 如质量衰减系数、质能转移系数和质能吸收系数等; 另一类是针对带电粒子(如 α 射线、 β 射线)而言, 如总质量阻止本领、质量碰撞阻止本领、质量辐射阻止本领、定限线碰撞阻止本领等。

这些系数通常是对指定的辐射、辐射能量、物质以及相互作用类型而言的。一般在定义中无需这一类的说明,但在应用相互作用系数数值时,这一类的说明是非常重要的。在核数据手册中通常会给出不同能量的射线对不同物质的各类相互作用系数值。

1.2.1 质量衰减系数 μ_m

定义:某一物质对特定能量的间接致电离粒子的质量衰减系数 (Mass Attenuation Coefficient) μ_m 是 dN/N 除以 ρdl 所得的商,即

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{dN/N}{\rho dl} \quad (1.15)$$

式中, ρ 为辐射所作用物质的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; N 为射线穿行 dl 距离前的初始粒子数, 无量纲; dN/N 为初始粒子数为 N 的辐射在密度为 ρ 的物质中穿行 dl 距离时经受相互作用的分数, 无量纲; dl 为辐射在物质中穿行的距离, m ; μ 为线衰减系数, m^{-1} ; μ_m 为质量衰减系数, $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

说明:

(1) 质量衰减系数的物理意义。下面以光子与物质相互作用为例来说明质量衰减系数的物理意义。光子在物质中穿行一段距离时, 由于相互作用机制的原因, 有的与物质发生了相互作用, 有的则没有发生相互作用, 这里所谓相互作用是指能使光子的能量或方向发生改变的过程。经受相互作用的光子数可用发生相互作用的概率来表示。线衰减系数就是入射光子在物质中穿过单位距离物质时平均发生总的相互作用的概率。而线衰减系数 (linear attenuation coefficient) 除以物质的密度则为质量衰减系数, 它表示入射光子在物质中穿过单位质量厚度物质时平均发生总的相互作用的概率。由于线衰减系数数值受物质的密度影响变化较大不便于应用, 因而引入质量衰减系数以消除密度的影响。研究光子在物质中减弱时经常应用质量衰减系数。

(2) 上述中总的相互作用是指所发生的一切相互作用。因此, 线衰减系数应等于各相互作用过程的线衰减系数之和, 质量衰减系数应等于各相互作用过程的质量衰减系数之和。

$$\mu = \tau + \sigma_c + \sigma_{\text{col}} + \kappa \quad (1.16)$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma_c}{\rho} + \frac{\sigma_{\text{col}}}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho} \quad (1.17)$$

对于光子, 线衰减系数可用式(1.16)表示, 质量衰减系数可用式(1.17)表示, 公式应用的范围是在核的相互作用不重要的情况下, 如果光子的能量超过几兆电子伏时可能还要增加与其他相互作用项。式(1.16)中的 τ 为光电效应线衰减系数, σ_c 为康普顿效应线衰减系数, σ_{col} 为相干散射效应线衰减系数, κ 为电子对效应线衰减系数。

(3) 混合物和化合物中的质量衰减系数的计算。上面讨论的是单一元素组成物质而言, 如果物质是混合物, 其密度为 ρ , 所含元素的质量衰减系数分别为 $(\mu/\rho)_1, (\mu/\rho)_2, \dots, (\mu/\rho)_i$, 混合物组成元素的质量分数分别为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i$, 则混合物的质量衰减系数为

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1 \omega_1 + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2 \omega_2 + \dots + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \omega_i \quad (1.18)$$

对于化合物, 由于在分子中原子之间的化学结合能是非常小的, 通常均将化合物看做是独立原子的混合物, 可以按式(1.18)处理原则进行, 但偶尔也会出现错误, 如对于低能光子的情况。

(4) 在原子核物理中, 辐射与物质相互作用通常采用的是微观截面(σ)的概念, 而在电离辐射剂量学相互作用采用的是线衰减系数(μ)的概念。它们一个是微观量, 一个是宏观量, 它

们之间的关系为

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{M} \sigma \quad (1.19)$$

发生联系并相互转换。公式建立的前提是在给定的原子类型的靶中,各个靶体之间的相互作用可以忽略不计。式中 N_A 是阿伏伽德罗常数, σ 是总的微观截面。

1.2.2 质能转移系数 μ_{tr}/ρ

定义: 某物质对间接致电离粒子的质能转移系数 (Mass Energy Transfer Coefficient) μ_{tr}/ρ 是 dE_{tr}/EN 除以 ρdl 所得的商,即

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{dE_{tr}/NE}{\rho dl} \quad (1.20)$$

式中, ρ 为辐射所作用物质的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; N 为射线穿行 dl 距离前的初始粒子数,无量纲; E 为穿行 dl 距离前的初始粒子的能量(不包括粒子本身的静止能), J; dE_{tr} 为由间接致电离粒子与作用物质相互作用产生的全部带电粒子的初始动能之和, J; dl 为辐射在物质中穿行的距离, m; dE_{tr}/EN 为初始粒子数为 N 的辐射在密度为 ρ 的物质中穿行 dl 距离时,其能量由于相互作用而转变成带电粒子能量的分数,无量纲; μ_{tr} 为线能量转移系数, m^{-1} ; μ_{tr}/ρ 为质能转移系数, $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

说明:

(1) 质能转移系数的物理意义。质能转移系数定量描述了入射的间接致电离粒子在物质中穿过一定距离的过程中,其总能量中有多少能量转移为带电粒子的动能,这些带电粒子是入射的间接致电离粒子与物质相互作用时所产生的。

(2) 对于 X 射线和 γ 射线,由于射线与物质作用有不同的作用机制,因而对 X 射线和 γ 射线,质能转移系数 μ_{tr}/ρ 应等于各相互作用过程的分质能转移系数总和,即

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\tau_a}{\rho} + \frac{\sigma_{en}}{\rho} + \frac{\kappa_a}{\rho} \quad (1.21)$$

式中, τ_a/ρ 为光电效应质能转移系数, σ_{en}/ρ 为康普顿效应质能转移系数, κ_a/ρ 为电子对效应质能转移系数。若光子能量超过几兆电子伏,可能还要外加一些其他相互作用的项。这些系数与其相应的质量衰减系数的关系可分别由式

$$\frac{\tau_a}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} \left(1 - \frac{\delta}{h\nu} \right) \quad (1.22)$$

$$\frac{\sigma_{en}}{\rho} = \frac{\sigma_e}{\rho} \frac{\overline{E_e}}{h\nu} \quad (1.23)$$

$$\frac{\kappa_a}{\rho} = \frac{\kappa}{\rho} \left(1 - \frac{2m_e c^2}{h\nu} \right) \quad (1.24)$$

进行计算。式(1.22)中, δ 表示每个被吸收光子(能量为 $h\nu$) 以荧光辐射形式放出的平均能量。式(1.23)中的 $\overline{E_e}$ 为康普顿效应反冲电子的平均能量。式(1.24)中的 $m_e c^2$ 是电子的静止能量。

(3) 对于中子而言,质能转移系数可以写成如下形式:

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{E} \sum_L N_L \sum_J \epsilon_{LJ}(E) \sigma_{LJ}(E) \quad (1.25)$$

式中,符号 L 表示核素,符号 J 表示核反应类型(如弹性散射, (n, α) , 非弹性散射等)。 N_L 为某一体积元中第 L 种核素的数目除以该体积元中物质的质量所得的商。 $\epsilon_{L,J}(E)$ 是在一次截面为 $\sigma_{L,J}(E)$ 的相互作用中,转变成带电粒子动能的平均能量。

(4) 混合物和化合物中的质能转移系数的计算。上面讨论的是单一元素组成的物质,如果物质是混合物,其密度为 ρ ,所含元素的质能转移系数分别为 $(\mu_{tr}/\rho)_1, (\mu_{tr}/\rho)_2, \dots, (\mu_{tr}/\rho)_i$, 混合物组成元素的质量分数分别为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i$, 则混合物的质能转移系数的计算式为

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_1 \omega_1 + \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_2 \omega_2 + \dots + \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_i \omega_i \quad (1.26)$$

对于化合物,由于在分子中原子之间的化学结合能是非常小的,通常均将化合物看做是独立原子的混合物,可以按式(1.26)处理原则进行,但偶尔也会出现错误,如对于低能光子的情况。

1.2.3 质能吸收系数 μ_{en}/ρ

定义:某物质对间接致电离粒子的质能吸收系数(Mass Energy Absorption Coefficient) μ_{en}/ρ 是质能转移系数 μ_{tr}/ρ 和 $(1 - g)$ 的乘积,即

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - g) \quad (1.27)$$

式中, g 为在该物质中次级带电粒子的能量以韧致辐射形式损失的分数,无量纲; μ_{en} 为线质能吸收系数, m^{-1} ; μ_{en}/ρ 为质能吸收系数, $m^2 \cdot kg^{-1}$ 。

说明:

(1) 间接致电离粒子转移给次级带电粒子的动能有一部分可以转移为次级带电粒子所产生的可以离开研究区域的韧致辐射的能量,扣除这一韧致辐射能量之后,剩余的能量消耗在所考虑的物质中,这是真正被物质吸收的能量,质能吸收系数就是对这一概念的定量描述。

(2) 质能吸收系数 (μ_{en}/ρ) 和质能转移系数 (μ_{tr}/ρ) 的数值关系,与次级带电粒子的动能和辐射所作用物质等有关。当次级带电粒子的动能可与其静止能相比拟或大于其静止能时,或与高原子序数物质相互作用时,两者可能会有显著差异。

(3) 对于混合物和化合物的质能吸收系数可按照前述的形式进行计算。

1.2.4 总质量阻止本领 S_m

定义:某物质对带电粒子的总质量阻止本领(Total Mass Stopping Power) S_m 是 dE 除以 ρdl 所得的商,其中 dE 是带电粒子在密度为 ρ 的物质中穿行 dl 距离时所损失的能量,即

$$S_m = \frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} \quad (1.28)$$

式中, ρ 为辐射所作用物质的密度, $kg \cdot m^{-3}$; dl 为辐射在物质中穿行的距离, m ; S 为总线阻止本领, $J \cdot m^{-1}$; S_m 为总质量阻止本领, $J \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$ 。

说明:

(1) 在辐射与物质相互作用时,带电粒子在物质中的行为是一个基本过程,这个过程可概括描述为带电粒子在行进的路程中通过与物质的原子核、电子相互作用而发生的能量损失。用能量损失与穿过的路程之比来定量描述带电粒子损失能量的过程就是阻止本领的概念。显

然它是就某种物质对某特定能量的带电粒子(如 α 射线, β 射线)而言的。

(2) 阻止本领定义中所指的能量损失, 包括各种类型的全部能量损失。粒子的行程以线长度表示为线阻止本领, 即 $S = dE/dl$; 粒子的行程以单位面积内的质量 ρdl 表示时为质量阻止本领, 即 $S_m = dE/\rho dl$ 。对于核反应可以忽略不计的能量范围内(一般在 10 MeV 以下), 碰撞电离损失和韧致辐射损失是带电粒子主要的能量损失类型, 这时总质量阻止本领可写为

$$S_m = \frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col}} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{rad}} = \left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{col}} + \left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{rad}} \quad (1.29)$$

式中, $(dE/dl)_{\text{col}} = S_{\text{col}}$ 为线碰撞阻止本领, $(dE/dl)_{\text{rad}} = S_{\text{rad}}$ 为线辐射阻止本领。

1.2.5 定限线碰撞阻止本领 L_Δ

定义: 某物质对带电粒子的定限线碰撞阻止本领(Restricted Linear Collision Stopping Power) L_Δ 是 dE 除以 dl 所得的商, 其中 dE 是带电粒子在物质中穿行 dl 距离时由于与电子碰撞而损失的能量, 在这类碰撞中其能量损失小于 Δ , 即

$$L_\Delta = \left(\frac{dE}{dl} \right)_\Delta \quad (1.30)$$

式中, dl 为粒子穿行的距离, m; dE 为由能量转移小于某一特定值的碰撞所造成的能量损失, J; L_Δ 为定限线碰撞阻止本领, $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

定限线碰撞阻止本领又称为传能线密度(Linear Energy Transfer, LET)。定义中规定的是能量截止而不是射程截止, 有时将这种能量称作“局部转移能量”。同时, 为了简化表示方法, Δ 的单位可用 eV 表示。例如, L_{100} 就应理解为能量截止值为 100 eV 的线能量转移。包括一切可能的能量损失在内的线碰撞阻止本领与总碰撞阻止本领关系为

$$L_\infty = S_{\text{col}} \quad (1.31)$$

1.3 电离辐射剂量学常用的物理量

电离辐射剂量学量的目的是为了对电离辐射所致真实效应或潜在效应提供一种物理学上的量度。由于电离辐射与物质的相互作用从本质上是一种能量的传递, 导致了电离辐射的能量被物质吸收, 而物质吸收射线能量发生各种变化。物质吸收的能量越多, 则由辐射引起的各种变化或效应越明显, 因而, 可用物质吸收辐射能量的多少来作为一种物理量度。

电离辐射剂量学的量本质上可由 1.1 节描述的辐射场的量和 1.2 节介绍的相互作用系数的乘积进行度量。但是由于历史的原因, 实际中由于电离辐射剂量学的量通常可以被直接测量, 因而不用上述方式定义, 而采用直接定义的方式确定电离辐射剂量学量。本节主要介绍电离辐射剂量学领域常用的吸收剂量、比释动能和照射量, 同时对这些量之间的关系, 以及它们与描述辐射场的量和相互作用系数的关系进行介绍。

1.3.1 吸收剂量 D

第二次世界大战以后, 随着加速器和各种同位素在医疗及其他部门的广泛应用, 产生了对中子及其他电离辐射准确测量物质中的能量吸收的要求。1948 年帕克(H. K. Parker)曾建议用物理伦琴当量(rep)为单位表示物质吸收辐射的能量, 1 个物理伦琴当量是在 1 伦琴 X 射线

照射下,每克空气中所吸收的能量,但这个单位并没有作为一个正式的剂量单位被 ICRU 采用和普遍接受。1953 年 ICRU 正式建议引入吸收剂量,并规定其单位为拉德。1962 年 ICRU 在其第 10 号报告正式定义吸收剂量,用来表示电离辐射给予 1 个体积元物质的能量。1975 年第 15 届国际计量大会决定把吸收剂量的国际制单位专门名称定为戈瑞(Gy)。目前,这个量已被广泛应用于放射生物学、辐射化学、辐射防护等学科领域。下面介绍随机量、吸收剂量、授予能、吸收剂量率、线能量等有关概念。

1. 随机量和非随机量的概念

在客观世界中许多现象的发生是服从统计分布规律的。在电离辐射领域,电离辐射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。为了观察它们的统计规律必须进行大量的观察分析。服从统计规律的量称为随机量。例如观察辐射作用于细胞核线度(几微米)大小的物质时,致电离粒子击中这个小体积内的物质是一个随机的事件,而辐射将能量沉积在其中的数值也是服从统计涨落的,因此描述这种能量沉积的量是随机量。随机量具有下述特性:一是它只能在有限范围内定义,其数值变化在空间和时间上是不连续的,因而通常不提它的变化率。二是它的数值不能预测,但任何一个特定值的概率都可由其概率分布确定。三是量的随机性对确定该量单次值的精度并无影响。不服从统计分布的量称为非随机量。上节介绍的粒子注量、能注量等都是非随机量。统计量的均值也是非随机量。非随机量具有下述特性:一是它定义为点函数,一般来说是空间和时间的连续可微函数,可以论述它的梯度和变化率;二是对于给定条件,原则上可以计算出它的数值;三是它可以用有关联的随机量的平均观察值进行估计。

2. 吸收剂量 D

定义:吸收剂量(Absorption Dose)为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 的商,即

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1.32)$$

式中, $\bar{\epsilon}$ 为平均授予能,它是随机量授予能(ϵ)的期望值,J; dm 为物质的质量,kg; D 为吸收剂量, $J \cdot kg^{-1}$ 。

说明:

(1) 吸收剂量 SI 单位有一个专门名称戈[瑞](Gy,gray), $1 Gy = 1 J \cdot kg^{-1}$ 。历史上吸收剂量的单位还使用过专用单位拉德(rad), $1 rad = 10^{-2} J \cdot kg^{-1} = 10^{-2} Gy$ 。

(2) 从定义可以看出,吸收剂量是当电离辐射与物质相互作用时,用来表示单位质量的物质吸收电离辐射能量多少的一个物理量。吸收剂量是一个非常重要的辐射量。同时,由于吸收剂量总是指某一介质中某一点而言,因此在说到吸收剂量具体数值时应说明介质的种类和所在的位置。

(3) 定义吸收剂量的意图是想提供一种与电离辐射效应相关联的物理学度量。在辐射防护领域,当应用吸收剂量的概念进一步定义辐射防护领域的防护量时,则进一步引入器官吸收剂量的定义,它是对组织或器官求平均的一个量;当应用吸收剂量的概念定义辐射防护领域的实用量时,则它是对人体组织或器官、或者体模(数学体模)中某点定义的量。

(4) 吸收剂量的数学定义同样采用了微分的形式,这是为了定义的严谨性以确保辐射作用物质后物质吸收能量数值的唯一性和确定性,也就是讲吸收剂量是一个非随机量。但在实

际中,如利用测量仪器测量物质中某点的吸收剂量时可能要求严格按照定义进行测量。

3. 授予能 ϵ

定义:授予能(Energy Imparted) ϵ 是进入介质中某一体积的全部带电电离粒子和间接致电离粒子能量的总和,与离开该体积的全部带电电离粒子和间接致电离粒子能量总和之差,再减去在该体积内发生任何核反应或基本粒子反应所增加的静止质量的等效能量,其表示式为

$$\epsilon = \sum \epsilon_{in} - \sum \epsilon_{out} - \sum Q \quad (1.33)$$

式中, $\sum \epsilon_{in}$ 为进入这一体积的全部带电电离粒子和间接致电离粒子能量(不包括静止能量)总和, $\sum \epsilon_{out}$ 为离开这一体积的全部带电电离粒子和间接致电离粒子能量(不包括静止能量)的总和, $\sum Q$ 为在该体积内发生任何核反应或基本粒子反应所增加的静止质量的等效能量, J ; ϵ 为授予能, J 。

说明:

(1) 由于授予能 ϵ 描述的是电离辐射通过电离、激发等相互作用将能量传递给某一体积中物质的能量,而电离辐射与物质发生相互作用是一个随机过程,在作用过程中能量转移的多少也存在随机性,这是讲每一次相互作用无论其发生的时间、地点还是能量转移的数量大小,均具有很大的随机性。因此,电离辐射授予某一体积内的能量,必然存在统计涨落,特别是当观察体积较小或粒子注量较低时,这种统计涨落可能达到很大程度。因此,授予能 ϵ 是一个随机量,它遵从统计学规律。

(2) 授予能 ϵ 是一个随机量,无法预测它的数值,只能根据几率分布确定其取任一特定数值的几率。根据统计学知识,授予能具有几率分布函数 $F(\epsilon)$ 和几率密度 $f(\epsilon)$ 。随机量授予能的期望值就是吸收剂量定义用到的平均授予能(有时也称为积分吸收剂量)。平均授予能则是一个非随机量,在实际上可用授予能的实验均值作为平均授予能的估计值。平均授予能与授予能的关系为

$$\bar{\epsilon} = \int_0^{\infty} \epsilon f(\epsilon) d\epsilon / \int_0^{\infty} f(\epsilon) d\epsilon \quad (1.34)$$

(3) 授予能 ϵ 数值的大小与相互作用过程密切相关。例如通过理论分析可以得出,电离过程对授予能的贡献在数值上等于一个电子的平均结合能(或称平均电离能);激发过程对授予能的贡献在数值上等于激发前、后电子结合能的差;光电效应并发射特征X射线过程对授予能的贡献在数值上等于一个L层电子的结合能,而光电效应并伴随俄歇电子发射过程对授予能的贡献在数值上等于二个L层电子的结合能。

4. 吸收剂量率 $\dot{D}$

定义:吸收剂量率(Absorption Dose Rate) $\dot{D}$ 为在 dt 时间内吸收剂量的增量 dD 除以 dt 的商,即

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (1.35)$$

式中, $\dot{D}$ 为吸收剂量率, $Gy \cdot s^{-1}$ 。

吸收剂量率的单位为戈[瑞]·秒⁻¹($Gy \cdot s^{-1}$), $1 Gy \cdot s^{-1} = 1 J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$ 。历史上吸收剂量率的单位还使用过专用单位拉德·秒⁻¹($rad \cdot s^{-1}$)。

5. 线能量 y

定义:

$$y = \frac{\epsilon}{\bar{l}} \quad (1.36)$$

式中, ϵ 为授予能, J; $\bar{l}$ 为研究体积内的平均弦长, m; y 为线能量 (Linear Energy), $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

说明:

(1) 线能量是代表单个事件的能量沉积, 所以作为用于描述辐射品质的物理量, 从原理上讲它比前述定义的传能线密度 (即定限线碰撞阻止本领) 在微剂量学领域更有意义。虽然线能量有可能直接测量的特性, 但是在辐射防护领域采用的仍然是传能线密度 (L)。

(2) 线能量是一个随机量, 线能量的分布与吸收剂量或吸收剂量率无关。 $\bar{l}$ 是研究体积内的平均弦长, 某一体积内的平均弦长是该体积内随机排列的弦的平均长度, 对于凸面体来说, $\bar{l} = 4V/S$, 其中 V 是体积, S 为表面积。

1.3.2 比释动能 K (Kerma Kinetic energy released in material)

对于间接致电离粒子 (如中子、X 射线、 γ 射线) 在物质中的能量沉积过程可分为两个步骤: 一是间接致电离粒子通过与物质相互作用把能量转移给可直接产生电离等作用的次级带电粒子; 二是次级带电粒子再通过电离、激发等作用把能量沉积在物质中。吸收剂量仅表示了间接致电离粒子与物质相互作用能量传递过程中的第二个步骤。对于第一个步骤, 需要采用引入的比释动能进行度量, 即用比释动能度量间接致电离粒子与物质相互作用时, 把多少能量传递给次级带电粒子。

1. 比释动能 K

定义: 比释动能 K 为间接致电离粒子在质量为 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 的商, 即

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (1.37)$$

式中, dE_{tr} 为间接致电离粒子在质量为 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 (包括这些带电粒子在韧致辐射过程中放出的能量, 以及在这一质量元中发生的次级过程中产生的任何带电粒子的能量, 因而也包括俄歇电子的能量在内), J; dm 为所考虑的体积元内物质的质量, kg; K 为比释动能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

说明:

(1) 比释动能 SI 单位有一个专门名称为戈 [瑞] (Gy), $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。历史上比释动能单位还使用过专用单位拉德 (rad)。比释动能和吸收剂量具有相同的量纲和单位, 但它们在概念上是完全不同的两个物理量, 这一点需要注意区别。比释动能度量了间接致电离粒子与物质相互作用时, 把多少能量传递给了次级带电粒子。

(2) 对辐射场而言, 可以用能注量等描述辐射场的基本特征。但就剂量学目的而言, 更方便的是某种适当物质中的比释动能方便地描述间接致电离粒子场。对中等能量的电离辐射来讲, 这种物质可以是空气; 对医学或生物学中应用的所有间接致电离粒子而言, 可以是适当的生物组织成份; 对于辐射效应的研究工作, 可以是任何有关的物质。另外在提到比释动能时, 也必须指明介质种类和所在位置。

2. 比释动能率 $\dot{K}$

定义: 比释动能率 (Kerma Rate) $\dot{K}$ 为在 dt 时间内比释动能的增量 dK 除以 dt 的商, 即

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} \quad (1.38)$$