

辐射剂量学的概念

〔美〕 Kenneth R. Kase
Walter R. Nelson

计 量 出 版 社

辐射剂量学的概念

【美】Kenneth R. Kase and Walter R. Nelson

徐 沔 译 蒋洪第 校

计量出版社

1983·北京

内 容 提 要

本书是一本讲述辐射剂量学概念的专著，共分六章。主要介绍基本概念：电磁辐射与物质的相互作用；带电粒子与物质的相互作用；物质中的能量分布；剂量计算；辐射剂量测量的空腔电离室理论。书后附录给出了用于剂量计算所需的有关实用函数图线。

本书可供从事辐射物理、放射医学、放射生物学、保健物理、辐射防护、辐射应用研究等剂量工作者、科研人员 and 高校有关专业师生参考。

CONCEPTS OF RADIATION DOSIMETRY

Kenneth R. Kase and Walter R. Nelson

Pergamon Press Inc. 1974

辐射剂量学的概念

(美) Kenneth R. Kase and Walter R. Nelson

徐 西 译 蒋洪第 校

责任编辑 陈艳春

计量出版社出版

(北京和平门内大街7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/32 印张 6

字数 134 千字 印数 1—10 000

1983年9月第一版 1983年9月第一次印刷

统一书号 15210·247

定价 0.81元

序 言

一九七〇年春天，在斯坦福大学，作者为一系列讨论会讲辐射剂量学的概念，由那时的讲义整理成现在这本专题著作。原稿讨论了从基本粒子相互作用到空腔电离室理论的基础知识，这对理解光子和带电粒子剂量测量原理是必需的。斯坦福直线加速器中心的保健物理学家们，对高能光子和带电粒子剂量学感兴趣。因此，贯穿整个教材，我们突出剂量学原理对高能情况的推广。我们希望，读者将增进对 π 、 μ 介子以及高能电子和光子这样一些粒子的剂量学的了解。因为讨论会的听众主要是有经验的保健物理学家、辐射物理学家、核工程师和医生，所以介绍的素材是在对数学和物理学有较深的理解的水平上提出的。

本书不去详细论述所涉及的全部理论，因为这在一些教科书中已讲得很充分。我们着重讨论有关的理论和它们对剂量学的关系。我们尽量把带电粒子和光子剂量学所需要的知识集中在一起，并引述一些有关的文献，以便读者可查阅更基础的知识或更完整的理论处理。我们希望这本书对保健物理学家和辐射物理学家能有所帮助。

本书的素材主要取自下列参考文献：

1. F.H. Attix, W.C. Roesch and E. Tochilin Radiation Dosimetry, Second Edition, Volume I, Fundamentals (Academic Press, New York, 1968) .
2. J.J. Fitzgerald, G.L. Brownell and F.J. Mahoney, Mathematical Theory of Radiation Dosimetry (Gordon and Breach, New York, 1967).

3. K.Z.Morgan and J.E.Turner. Principles of
Radiation Protection (Krieger Publishing Co.,
New York, 1973) .

书中直接引用上述这些书时，加注 (ART)，(FBM) 和 (MT)。其他参考文献列在每章之后，正文中用数字标示。

作者感谢 Dr.R.McCall 和 W. Patterson 并特别感谢讨论会的主办人斯坦福大学的 C.J. Karzmark 教授 (辐射学) 和 T.J. Connolly 教授 (核工程) 的鼓励和支持。我们感谢 Dr.H.DeStaebler 对第二、三章的审阅和 Dr.G.Svensson 对第六章的审阅。总之，他们的意见对我们很有帮助。气泡室的图片是斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 实验 B 组的 Dr.J. Loos 提供、由 G. Fritzke 制备的。最后，我们感谢参加讨论会和进行讨论的人们。

目 录

第一章 基本概念	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 剂量学术语	(1)
1.3 随机量和宏观量	(5)
1.4 照射量	(6)
1.5 授与能和能量转移	(7)
1.6 带电粒子平衡	(10)
参考文献	(11)
第二章 电磁辐射与物质的相互作用	(12)
2.1 引 言	(12)
2.2 可忽略的过程	(13)
2.3 次要过程	(15)
2.4 主要过程	(16)
2.5 衰减和吸收	(26)
参考文献	(28)
第三章 带电粒子相互作用	(29)
3.1 引 言	(29)
3.2 碰撞过程的运动学	(30)
3.3 与自由电子的碰撞几率	(32)
3.4 电离损失	(37)
3.5 限制的阻止本领 (LET)	(41)
3.6 化合物	(42)
3.7 碰撞能量损失的 Gaussian 涨落	(43)
3.8 碰撞能量损失的 Landau 涨落	(47)
3.9 辐射过程和辐射几率	(47)
3.10 辐射能量损失和辐射长度	(51)

3.11	电子的碰撞能量损失和辐射能量损失的比较	(53)
3.12	重粒子的辐射能量损失	(55)
3.13	辐射能量损失的涨落	(56)
3.14	射程和射程离散	(57)
3.15	带电粒子的弹性散射	(59)
3.16	阻止本领和射程的换算定律	(70)
	参考文献	(73)
第四章	物质中的能量分布	(75)
4.1	引言	(75)
4.2	线能量转移	(76)
4.3	δ 射线	(78)
4.4	LET 分布	(79)
4.5	事件尺寸(线能量)	(82)
4.6	局部能量密度(z)(比授与能)	(83)
4.7	结论	(87)
	参考文献	(90)
第五章	剂量计算	(91)
5.1	引言	(91)
5.2	源	(91)
5.3	通量密度	(92)
5.4	各向同性点源	(92)
5.5	线源	(93)
5.6	面源	(98)
5.7	无限大平板源	(102)
5.8	正圆柱源:均匀活度分布,无限大平板屏蔽	(104)
5.9	球形源:均匀活度分布,无限大平板屏蔽	(109)
5.10	球形源:场位于球心	(112)
5.11	辐射的输运	(113)
5.12	无碰撞通量密度计算的积累因子校正	(115)
5.13	用公式表示的近似积累因子	(118)

5.14 γ 辐射吸收剂量的计算	(120)
参考文献	(125)
第六章 辐射剂量的测量空腔电离室理论	(127)
6.1 引 言	(127)
6.2 空腔尺寸比电子射程小	(128)
6.3 空腔尺寸的影响	(135)
6.4 吸收剂量的测量	(137)
6.5 空腔理论用于光子场 (f 和 C_A)	(141)
6.6 空腔理论用于电子场 (C_E)	(143)
6.7 形成一对离子需要的平均能量 (W)	(145)
参考文献	(146)
附 录	(148)

第一章 基本概念

1.1 引言

在着手研究辐射剂量学之前，有必要了解所涉及的基本概念和术语。辐射剂量学的历史充满了众多而且往往是混乱的概念和定义。我们讨论剂量学使用“国际辐射单位与测量委员会”(ICRU)1971年第19号报告(辐射量和单位)⁽¹⁾中定义的概念、量和单位。应用于本书的定义引自ICRU第19号报告的第1.2节。在定义之后，我们讨论一些在量的定义中涉及到的基本概念*。

1.2 剂量学术语

1. 直接电离粒子**——具有足够的动能，可通过碰撞产生电离的带电粒子。

2. 间接电离粒子**——能释放直接电离粒子或能引起核转变的非带电粒子。

3. 照射量(X)——照射量X是 dQ 被 dm 除所得的商， dQ 是光子在质量为 dm 的空气中释放的全部电子(负的和正的)，在空气中完全被阻止时产生的一种符号的离子的总电量的绝对值。

* ICRU已公布第33号报告(“辐射量和单位”，1980)。本书提到的名词和量的定义，在文字上参照ICRU第33号报告作了一些订正，仍用本书的符号。

关于辐射量和单位的叙述，ICRU第33号报告比第19号报告有较大的变动，(当然，主要量的定义无重大变化)。这里不便全面引述。所以对本章内容读者可参阅ICRU第33号报告——译者注。

** ICRU第33号报告直接引入“带电粒子”、“非带电粒子”的术语——译者注。

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

照射量的单位是 $C \cdot kg^{-1}$ ，专用单位伦琴 (R) 可暂时使用。

$$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C \cdot kg^{-1} \text{ (精确值)}$$

4. 吸收剂量 (D) —— 吸收剂量 D 是 $d\bar{E}_D$ 被 dm 除所得的商， $d\bar{E}_D$ 是电离辐射给予质量为 dm 的物质的平均授与能量。

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

吸收剂量的单位是 $J \cdot kg^{-1}$ ，专门名称为戈瑞 (Gray)，符号为 Gy。

$$1 Gy = 1 J \cdot kg^{-1}$$

专用单位拉德 (rad) 可暂时使用。

$$1 rad = 10^{-2} J \cdot kg^{-1}$$

5. 授与能 (E_D) —— 随机量授与能 E_D 是进入一体积的全部直接和间接电离粒子的动能总和 ΣE_E 和离开这一体积的全部直接和间接电离粒子动能总和 ΣE_L 之差，再减去在该体积中发生核或基本粒子反应产生的静止质量增加的等效能量 ΣE_R 。

$$E_D = \Sigma E_E - \Sigma E_L - \Sigma E_R$$

6. 平均授与能 ($\bar{E}_D$) —— 平均授与能 ($\bar{E}_D$) 是授与能的期望值，有时称为积分剂量。

7. 气体中每形成一个离子对所消耗的平均能量 ($\bar{W}$) —— 是 E 被 N 除所得的商， N 是当带电粒子的初始动能 E 完全在气体中消耗时形成的离子对平均数。

$$\bar{W} = \frac{E}{N}$$

单位是 J.

8. 粒子注量 (Φ)——是 dN 被 da 除所得的商, dN 是进入截面积为 da 的球的粒子数.

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

单位是 m^{-2} .

9. 粒子通量密度 (注量率) (ϕ)——是 $d\Phi$ 被 dt 除所得的商, $d\Phi$ 是在时间间隔 dt 里的粒子注量的增量

$$\phi = \frac{d\Phi}{dt}$$

单位是 $m^{-2} \cdot s^{-1}$.

10. 能量注量* (F)——是 dE_f 被 da 除所得的商, dE_f 是进入截面积 da 的球的全部粒子扣除静止能量后的能量总和.

$$F = \frac{dE_f}{da}$$

单位是 $J \cdot m^{-2}$.

11. 能量通量密度 (能量注量率) (I)——是 dF 被 dt 除所得的商, dF 是时间间隔 dt 内的能量注量的增量

$$I = \frac{dF}{dt}$$

单位是 $W \cdot m^{-2}$.

12. 比释动能 (K)——是 dE_K 被 dm 除所得的商, dE_K 是非带电电离粒子在质量为 dm 的物质中, 释放出来的全部带

* ICRU第33号报告定义: 能量注量 Ψ 是 dR 被 da 除所得的商, 其中 dR 是对截面积为 da 的球的辐射能 (the radiant energy) .

$$\Psi = \frac{dR}{da}$$

单位为 $J \cdot m^{-2}$ ——译者注.

电离粒子初始动能的总和。

$$K = \frac{dE_K}{dm}$$

单位为 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，专名为戈瑞 (Gy)。

13. 质量衰减系数 (μ/ρ)——物质对非带电电离粒子的质量衰减系数 μ/ρ 是 dN/N 被 ρdl 除所得的商。

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N} \frac{dN}{dl}$$

其中 dN/N 是粒子在密度为 ρ 的介质中，穿过距离 dl 时发生了相互作用的份额。

单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

14. 质量能量转移系数* (μ_K/ρ) ——物质对非带电电离粒子的质能转移系数 μ_K/ρ 是 dE_K/E 被 ρdl 除所得的商。

$$\frac{\mu_K}{\rho} = \frac{1}{\rho E} \frac{dE_K}{dl}$$

其中 dE_K/E 是入射粒子在密度为 ρ 的介质中穿过距离 dl 时，在其总能量（不包括静止能量）中，由于相互作用而转移为带电粒子动能的那部分所占的份额。

15. 质量能量吸收系数 (μ_{en}/ρ) ——物质对非带电电离粒子的质能吸收系数 μ_{en}/ρ 是质能转移系数 μ_K/ρ 和 $(1-G)$ 的乘积，其中 G 是次级带电粒子在物质中以韧致辐射损失的能

* ICRU 第33号报告定义如下：一物质对非带电电离粒子的质量能量转移系数 μ_{tr}/ρ 是 dE_{tr}/EN 被 ρdl 除所得的商，其中 E 是每个粒子的能量（不包括静止能量）， N 是粒子数， dE_{tr}/EN 是入射粒子在密度为 ρ 的介质中穿过距离 dl 时，由于相互作用而转移给带电粒子动能的那部分能量占入射粒子能量的份额。

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho EN} \frac{dE_{tr}}{dl}$$

单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ——译者注。

量的份额。

16. (总)质量阻止本领 (S/ρ)●——物质对带电粒子的质量阻止本领 S/ρ 是 dE_s 被 ρdl 除所得的商

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE_s}{dl}$$

其中 dE_s 是带电粒子在密度为 ρ 的介质中穿过距离 dl 时损失的能量。

17. 线能量转移(LET)●——带电粒子在介质中的线能量转移 LET 是 dE_L 被 dl 除所得的商, 其中 dE_L 是带电粒子穿过距离 dl , 由能量损失小于某一特定值 Δ 的与电子的碰撞所造成的能量损失。

18. 带电粒子平衡 (CPE)——如果离开体积 V 的具有确定能量的每一个带电粒子, 都被具有相同能量的另一个进入 V 的同类带电粒子所替代, 则在体积 V 的中心点 P 存在 CPE。如果在一点存在 CPE, 而且次级带电粒子产生的韧致辐射可以忽略, 则在该点吸收剂量等于比释动能: $D = K$ 。

1.3 随机量和宏观量

目前所定义的许多量, 如吸收剂量、照射量、注量等是宏观量。另一方面, 因为辐射场一般是空间不均匀的, 所以, 如授与能、释放的电量等随机量, 从一点到另一点变化可以很大。因而, 这些量必须对足够小的空间或时间范围, 通过某种极限方法来确定。我们用吸收剂量为例来说明这一方法。

吸收剂量是用对介质的授与能除以介质的质量来度量的。如果我们选择一大的质量元并测量授与能, 将得到一值

●这些术语的讨论见

$(E/m)_1$ (见图1.1)。现在, 如果我们取一较小的质量元并测得值 $(E/m)_2$, 一般情况, 我们发现 $(E/m)_2$ 是大于 $(E/m)_1$ 的。当 m 是大得足以引起初级辐射 (例如, X 射线) 的显著减弱时, 在所考虑的质量元中带电粒子注量是不均匀的。这使得比值 E/m 随质量 m 的减小而增加。

随着 m 的进一步减小, 我们会发现这样一个范围, 在这个范围内带电粒子注量相当均匀, 而比值 E/m 是常数。就是在此范围内的比值 E/m 代表吸收剂量。因此, 必须用对适当大小的质量元的授与能的期望值 $\bar{E}$ 来测定吸收剂量。

另一方面, m 又不能太小以致于能量沉积只是由几次相互作用产生的。如果 m 从 E/m 是常数的范围进一步减小, 我们发现比值会分散开, 即随着 m 取得很小, 能量沉积取决于在 m 中有没有带电粒子相互作用。显然, 对很多质量元, E 将为零, 而对另一些则很大。这些涨落是由于带电粒子损失能量不连续引起的。因此, 吸收剂量的测量也要求质量元 m 应足够大, 以使能量沉积是由许多粒子和许多次相互作用产生的。

对其他的量也可以进行类似的讨论, 必须认识到, 用微分符号定义的宏观量意味着已经使用了前述的极限方法。

1.4 照射量

当前定义的照射量要求光子在空气质量元中释放出的全部电子在空气中完全被阻止。并且要求收集被这些电子产生的一种符号的全部离子。所以, 为了进行照射量的绝对测量, 要求使用自由空气电离室。这反过来又限制了可实行照射量绝对测量的光子能量的上限。这一能量界限 (几百 keV) 是由电子射程和电离室尺寸决定的。

原则上对量 dQ/dm 没有能量限制。随着光子能量的增

加，仅仅存在测量照射量的准确度的实际限制。用空气等效空腔电离室可在任何能量下进行照射量的相对测量（见第六章）。这些测量的准确度与光子能量和电离室的结构有关。对直到几个MeV能量的光子，准确度可以达到1—2%。随着光子能量增加，因为不能收集质量元中释放的电子产生的全部离子，测量的不确定度加大。在光子释放的电子的射程范围内，当光子场有显著的减弱时，要引入更大的不确定度。显然，现在定义的照射量仅仅对能量低于几个 MeV 的光子场才是实用的。

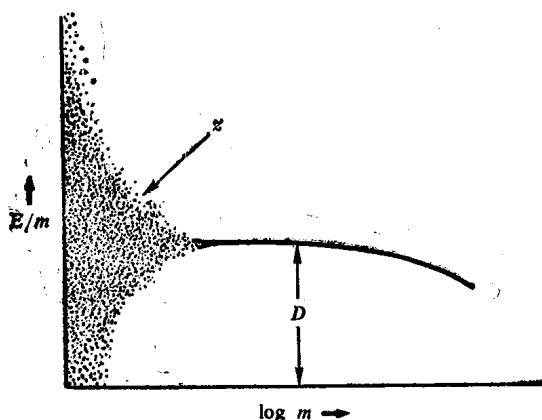


图1.1 能量密度作为质量的函数。能量密度是对此质量测定的。水平线覆盖的范围内吸收剂量可以一次测量来确定。阴影部分表示在此范围统计涨落很大

〔引自(ART)第二章〕

1.5 授与能和能量转移（吸收剂量和比释动能）

为了更好地理解吸收剂量，比释动能和带电粒子平衡，我们必须理解受照射的质量元，怎么建立能量平衡。图1.2

是一示意图，表示入射到一质量元的十个光子。每一个光子都代表一种进入和离开质量元的能量迁移。表 1.1 给出带电和非带电粒子进入和离开质量元的能量的一个分析。

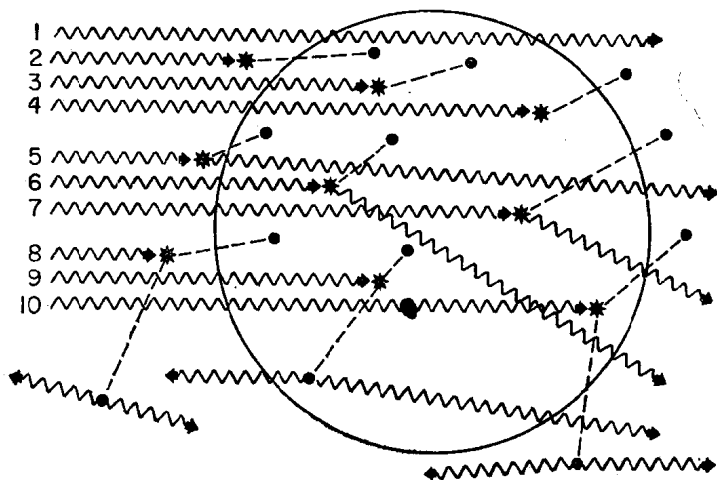


图1.2 CPE条件下的授与能

进入和离开这一质量元的带电粒子能量分别记作 $(E_E)_e$ 和 $(E_L)_e$ ；进入和离开这一质量元的非带电粒子能量分别记作 $(E_E)_u$ 和 $(E_L)_u$ ；而 $(E_R)_u$ 表示在质量元中转化为静止质量的能量。对质量元的授与能 (E_D) 等于所有能量成分的代数和

$$E_D = \Sigma(E_E)_e - \Sigma(E_L)_e + \Sigma(E_E)_u - \Sigma(E_L)_u - \Sigma(E_R)_u$$

这就是用于计算吸收剂量的能量，对本例即是：

$$E_D = 1.4 - 1.4 + 10.0 - 3.0 - 1.0 = 6.0 \text{ MeV}$$

如果在质量元内没有带电粒子辐射能量，则转移给质量元中带电粒子的能量 (E_K) 由非带电粒子各能量项的代数和确定，在这个例子中

$$E_K = 10.0 - 3.0 - 1.0 = 6.0 \text{ MeV}$$

表 1.1

	初始 γ 能量	次级 γ 能量	次级带电 粒子能量		$(E_E)_e$	$(E_L)_e$	$(E_E)_u$	$(E_L)_u$	$(E_R)_u$
			e^-	e^+					
1	0.5	—	—	—	0	0	0.5	0.5	0
2	0.5	—	0.5	—	0.3	0	0	0	0
3	0.5	—	0.5	—	0	0	0.5	0	0
4	0.5	—	0.5	—	0	0.2	0.5	0	0
5	1.0	0.5	0.5	—	0.3	0	0.5	0.5	0
6	1.0	0.5	0.5	—	0	0	1.0	0.5	0
7	1.0	0.5	0.5	—	0	0.2	1.0	0.5	0
8	3.0	—	1.0	1.0	0.8	0	0	0	0
9	3.0	—	1.0	1.0	0	0	3.0	1.0	0
10	3.0	—	1.0	1.0	0	1.0	3.0	0	1.0
Σ					1.4	1.4	10.0	3.0	1.0

这是用于计算比释动能的能量。

在这个例子中，进入质量元的带电粒子能量是严格被离开的带电粒子的能量所平衡，即

$$\Sigma(E_E)_e - \Sigma(E_L)_e = 1.4 - 1.4 = 0$$

因此，我们讲存在带电粒子平衡（CPE）。而且因为在质量元内没有次级带电粒子产生韧致辐射， $E_D = E_K$ ，所以吸收剂量将等于比释动能。

在质量元中当次级带电粒子通过产生韧致辐射损失能量时，即使存在CPE，吸收剂量和比释动能也不相等。图1.3说明了这种情况。在这种情况下，我们假定 $\Sigma(E_E)_e - \Sigma(E_L)_e = 0$ ，并且没有能量损失于静止质量的增加， $\Sigma(E_R)_u = 0$ 。所以对质量元的授与能是：

$$E_D = (\Sigma E_E)_{u_0} - (\Sigma E_L)_{u_1} - (\Sigma E_L)_{u_2}$$