

## 辐射剂量学概论(二)

郭 勇

中图分类号: R144.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2005)02-0000-05

## 2 辐射剂量学的量和单位

## 2.1 辐射剂量学和单位的发展概况

1925 年成立了“国际辐射单位和测量委员会(ICRU), 这是一个非官方的专门从事电离辐射剂量学工作的学术团体, 这个机构特别着重于研究推荐各国采用的电离辐射量和单位。

电离辐射计量也与国际计量局有密切关系, 1911 年 M. Curie 建立了第一个镭基准, 1913 年把基准保存于国际计量局, 这个 21.99 mg 无水氯化镭薄玻璃管就成了国际镭基准, 直到 1939 年, 此镭基准才由 O. Honigschmid 在 1934 年制造的 20 个镭源中的一个所代替。

20 世纪 50 年代以来, 电离辐射的重要性大为提高, 国际计量委员会在 1958 年 10 月, 成立了电离辐射测量标准咨询委员会(CCEMRI), 1959 年 4 月 CCEMRI 在其第一次会议上建议: “国际计量局的业务要扩大到放射性和电离辐射”, 并建议委员会成为: “①确定量和单位的定义, ②建立包括中子、活度和电离辐射测量国际基准的中心机构”。1960 年 10 月第 11 届国际计量大会成立了一个“电离辐射计量处”, 1964 年新建的有关实验室落成。1969 年 CCEMRI 成立了四个组(X 射线、 $\gamma$  射线和电子、放射性测量; 中子测量、 $\alpha$  粒子能量基准)。

现行的电离辐射量和单位是 ICRU 第 33 号报告“辐射量和单位”(1980), ICRU 几年前就已预告它准备进行全面修订, 但至今未见刊出。1975 年和 1979 年经 ICRU 推荐, 由第 15 届和第 16 届国际计量大会通过决议, 给予几个主要的电离辐射量(活度、吸收剂量和剂量当量)以专门名称如下:

a. 活度的 SI 单位采用一专门名称: 贝可勒尔(Becquerel), 符号 Bq, 等于秒的倒数。

b. 电离辐射的 SI 单位采用一专门名称: 戈瑞(Gray), 符号 Gy, 等于焦耳每千克。

c. 采用专门名称希沃特(Sievert), 符号 Sv, 作为 SI 单位中的辐射防护的剂量单位, 希沃特等于焦耳每千克( $J \cdot kg^{-1}$ )。

## 2.2 主要的辐射量和单位

2.2.1 辐射学的量和单位 辐射学的量是关于辐射场的基本量, 它们主要是涉及粒子自身的量, 如粒子数、能量。若辐射场由各种能量的粒子组成并且有时需知粒子能量的谱分布, 则这种谱分布可以从相应量对能量  $E$  求导数而得。常用的辐射学的量有:

(1) 粒子数  $N$ , 是发射、传播或接收到的粒子数目。单位为 1。

(2) 辐射能  $R$ , 是发射、传播或接收到的粒子能量(不包括静止能量)。单位: J。

(3) (粒子)通量  $N$ , 是  $dN$  除以  $dt$  所得的商, 其中:  $dN$  是在时间间隔  $dt$  内粒子数的增量。单位:  $s^{-1}$ 。

$$N = \frac{dN}{dt} \quad (28)$$

(4) 能通量  $R$ , 是  $dR$  除以  $dt$  所得的商, 其中:  $dR$  是在时间

间隔  $dt$  内辐射能的增量。单位: W。

$$R = \frac{dR}{dt} \quad (29)$$

(5) (粒子)注量  $\Phi$ , 是  $dN$  除以  $da$  所得的商, 其中:  $dN$  是入射到截面积为  $da$  的球中的粒子数。单位:  $m^{-2}$ 。

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (30)$$

(6) 能注量  $\Psi$ , 是  $dR$  除以  $da$  所得的商, 其中:  $dR$  是入射到截面积为  $da$  的球中的辐射能。单位:  $Jm^{-2}$ 。

$$\Psi = \frac{dR}{da} \quad (31)$$

(7) (粒子)注量率  $\varphi$ , 是  $d\Phi$  除以  $dt$  所得的商, 其中:  $d\Phi$  是在时间间隔  $dt$  内粒子注量的增量。单位:  $m^{-2}s^{-1}$ 。这个量也可称做粒子通量密度。

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2N}{dadt} \quad (32)$$

(8) 能注量率  $\Psi$ , 是  $d\Psi$  除以  $dt$  所得的商, 其中:  $d\Psi$  是在时间间隔  $dt$  内能注量的增量。

$$\Psi = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d^2R}{dadt} \quad (33)$$

单位:  $Wm^{-2}$ 。这个量也可称做能通量密度。

2.2.2 相互作用系数 相互作用系数是描述辐射和物质之间相互作用的量。这类量表示某一指定的辐射、某一指定物质发生某一指定作用(定义中无需说明)。

(1) 靶体的截面  $\sigma$ , 对于入射的带电或非带电粒子所产生的一次相互作用, 靶体的截面是  $P$  除以  $\Phi$  所得的商。其中:  $P$  是粒子注量为  $\Phi$  时对一个靶体的相互作用几率。单位:  $m^2$ 。

$$\sigma = \frac{P}{\Phi} \quad (34)$$

① 这里的相互作用所指的是由于这些过程使入射粒子能量和(或)方向发生变化。相互作用后, 可能发射一个或多个次级粒子。截面的下标常用以表示入射和出射粒子类型, 如  $\sigma_{\gamma,n}$  表示光致中子发射截面, 也可用以表示原子的相互作用, 如  $\sigma_{\gamma,e}$  表示光电截面。

② 对某一给定的靶体, 可能有几种独立的相互作用, 则可用总截面  $\sigma$  (或  $\sigma_{tot}$ ,  $\sigma_t$ ) 表示各分截面  $\sigma_J$  之和:

$$\sigma = \sum_J \sigma_J = \frac{1}{\Phi} \sum_J P_J \quad (35)$$

式中:  $P_J$  为  $J$  型相互作用的几率。

(2) 质量减弱系数  $\mu/\rho$ , 某物质对非带电粒子的质量减弱系数  $\mu/\rho$  是  $dN/N$  除以  $\rho dl$  所得的商。其中:  $dN/N$  为粒子在密度为  $\rho$  的物质内穿行距离  $dl$  时经历相互作用的分数。单位:  $m^2kg^{-1}$ 。

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dN}{N dl} \quad (36)$$

①  $\mu$  是总线性减弱系数。

② 若在给定原子类型的靶中, 各靶体之间的相互作用可忽略不计, 质量减弱系数可用总截面  $\sigma$  和  $N_A/M$  的乘积表示。

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{M} \sigma \quad (37)$$

式中:  $N_A$  为阿伏伽德罗常数,  $M$  为靶元素的克分子量。

③对于光子, 可写做:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{M} (\sigma_{\gamma e} + \sigma_{\gamma \gamma e} + \sigma_{\gamma \gamma} + \sigma_{\gamma ee}) \quad (38)$$

式中:  $\sigma_{\gamma e}$ ,  $\sigma_{\gamma \gamma e}$ ,  $\sigma_{\gamma \gamma}$  和  $\sigma_{\gamma ee}$  分别表示光电效应, 康普顿效应, 相干散射和电子对效应截面。

④对于光子也可写做:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma_e}{\rho} + \frac{\sigma_{eh}}{\rho} + \frac{k}{\rho} \quad (39)$$

式中  $\tau/\rho$ ,  $\sigma_e/\rho$ ,  $\sigma_{eh}/\rho$  和  $k/\rho$  分别表示光电、康普顿、相干散射和电子对的质量减弱系数。

⑤ $\mu$  有时用  $\Sigma$  代替(多见于中子物理), 并称之为宏观截面:

$$\Sigma = n_1 \sigma_1 + \dots n_i \sigma_i + \dots \quad (40)$$

式中:  $n_i$  是单位体积中第  $i$  类型原子的数目,  $\sigma_i$  是第  $i$  种类型原子的截面。当介质的靶粒子处于静止时,  $\Sigma = 1/\lambda$ ,  $\lambda$  是平均自由程。

(3) 质能转移系数  $\mu_{tr}/\rho$ , 某物质对非带电粒子的质能转移系数是  $dE_{tr}/EN$  除以  $\rho dl$  所得的商, 其中:  $E$  为每一(非带电)粒子的能量(不包括静止能),  $N$  为粒子数,  $dE_{tr}/EN$  为入射粒子在密度为  $\rho$  的物质中穿行距离  $dl$  时, 其能量由于相互作用而转变为带电粒子能量的分数, 单位:  $m^2 kg^{-1}$ 。

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho EN} \frac{dE_{tr}}{dl} \quad (41)$$

①如同质量减弱系数一样, 质能转移系数也可用截面表示, 对光子通常不用截面表示, 而如下式:

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\tau_a}{\rho} + \frac{\sigma_{ea}}{\rho} + \frac{k_a}{\rho} \quad (42)$$

式中:  $\tau_a/\rho$ ,  $\sigma_{ea}/\rho$  和  $k_a/\rho$  分别为光电、康普顿和电子对的质能转移系数。

②对于中子, 可写做

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{E} \sum_L N_L \sum_J \epsilon_{LJ}(E) \sigma_{LJ}(E) \quad (43)$$

式中:  $L$  标志核素,  $J$  为核反应类型,  $N_L$  是某一体积元中第  $L$  种核素的数目除以该体积元中物质的质量所得的商。  $\epsilon_{LJ}(E)$  是在一次截面为  $\sigma_{LJ}(E)$  的相互作用中, 转变为带电粒子动能的平均能量。

(4) 质能吸收系数  $\mu_{en}/\rho$ , 某物质对非带电粒子的质能吸收系数是质能转移系数  $\mu_{tr}/\rho$  和  $(1-g)$  的乘积, 其中:  $g$  为在该物质中次级带电粒子的能量以韧致辐射方式损失的分数。

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1-g) \quad (44)$$

单位:  $m^2 kg^{-1}$ 。

(5) 总质量阻止本领  $S/\rho$ , 某物质对带电粒子的总质量阻止本领是  $dE$  除以  $\rho dl$  所得的商, 其中:  $dE$  是带电粒子在密度为  $\rho$  的物质中穿行距离  $dl$  时损失的能量。单位:  $Jm^2 kg^{-1}$ 。

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} \quad (45)$$

$E$  用 eV 时单位为  $eVm^2 kg^{-1}$ 。

①  $S$  为总线性阻止本领。

②核反应可忽略不计的能段, 总质量阻止本领为:

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dl} \right)_{\text{碰撞}} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dl} \right)_{\text{辐射}} \quad (46)$$

式中:  $(dE/dl)_{\text{碰撞}}$  和  $(dE/dl)_{\text{辐射}}$  分别为线性碰撞阻止本领

和线性辐射阻止本领, 符号为  $S_{\text{碰撞}}$  和  $S_{\text{辐射}}$ 。

(6) 传能线密度  $L_{\Delta}$  (又称限线碰撞阻止本领), 某物质对带电粒子的传能线密度是  $dE$  除以  $dl$  所得的商, 其中  $dE$  为带电粒子在穿行  $dl$  距离时由于与电子碰撞而损失的能量, 在此类碰撞中能量损失小于  $\Delta$ , 单位:  $Jm^{-1}$ 。

$$L_{\Delta} = \left( \frac{dE}{dl} \right)_{\Delta} \quad (47)$$

$E$  用 eV 时,  $L_{\Delta}$  可用  $eVm^{-1}$  或  $keV/\mu m$

①  $\Delta$  可用 eV 表示,  $L_{100}$  就是能量截止值为 100 eV 的传能线密度。

②  $L_{\infty} = S_{\text{碰撞}}$ 。

(7) 辐射化学产额  $G(x)$ , 是  $n(x)$  除以  $\bar{\epsilon}$  所得的商, 其中:  $n(x)$  是由于授与物质平均能量  $\bar{\epsilon}$  而使某一指定实体  $x$  中生成、破坏或变化的物质的平均量; 单位:  $mol J^{-1}$ 。

$$G(x) = \frac{n(x)}{\bar{\epsilon}} \quad (48)$$

(8) 气体中每形成一对离子所消耗的平均能量  $W$ , 是  $E$  除以  $N$  所得的商, 其中:  $N$  是带电粒子初始动能  $E$  完全在气体中耗尽时所形成的平均离子对数。单位: J, 也可用 eV 表示。

$$W = E/N \quad (49)$$

2.2.3 剂量学的量和单位 辐射对物质产生的影响决定于辐射场的强度和辐射与物质之间相互作用的程度。辐射剂量学就是用于量度电离辐射在受照体中所产生的真实和潜在效应, 因此辐射量和相互作用系数二者的乘积也就是剂量学的量。

(1) 授与能  $\epsilon$ , 电离辐射给予某一体积中物质的授与能是:

$$\epsilon = R_{\text{进}} - R_{\text{出}} + \sum Q \quad (50)$$

式中:  $R_{\text{进}}$  和  $R_{\text{出}}$  是进入和离开该体积的辐射能量, 也就是进入和离开该体积的所有带电和非带电粒子能量的总和(不包括静止能量)。  $\sum Q$  为在该体积内发生的任何核转化中核和基本粒子的一切静止质量能量变化的总和(减少为正, 增加为负)。授与能  $\epsilon$  单位: J。

①  $\epsilon$  是一个随机量。

②  $\bar{\epsilon}$  的期望值  $\bar{\epsilon}$  是平均授与能, 是非随机量。

(2) 线能  $y$ , 是  $\epsilon$  除以  $l$  所得的商, 其中:  $\epsilon$  是一次能量沉积事件中授与某一体积内物质的能量,  $l$  是该体积内的平均弦长。单位:  $Jm^{-1}$ 。

$$y = \frac{\epsilon}{l} \quad (51)$$

$\epsilon$  用 eV 时,  $y$  可用  $eVm^{-1}$  或  $keV \cdot \mu m^{-1}$ 。

①  $y$  是随机量。

②某一体积内的平均弦长是该本积内随机排列的弦的平均长度, 对于凸体,  $l = 4V/a$ ,  $V$  为体积,  $a$  为表面积。

(3) 比(授与)能  $Z$ , 是  $\epsilon$  除以  $m$  所得的商, 其中:  $\epsilon$  为电离辐射授与质量为  $m$  的物质的能量。  $Z$  是随机量。单位:  $Jkg^{-1}$ 。

$$Z = \frac{\epsilon}{m} \quad (52)$$

比能单位的专名是戈瑞(Gy)。  $1 Gy = 1 Jkg^{-1}$ 。

(4) 吸收剂量  $D$ , 是  $d\bar{\epsilon}$  除以  $dm$  所得的商, 其中:  $d\bar{\epsilon}$  是电离辐射给予质量为  $dm$  物质的平均能量。单位:  $Jkg^{-1}$ 。

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (53)$$

吸收剂量单位的专名为戈瑞(Gy)。  $1 Gy = 1 Jkg^{-1}$ 。应废除的非法定计量单位(专用单位)是拉德(rad),  $1 Gy = 100 rad$ 。

平均比能  $Z$  是非随机量, 可以由它给出吸收剂量的另一种定义:

$$D = \lim_{m \rightarrow 0} Z \quad (54)$$

即吸收剂量  $D$  等于质量  $m$  趋于零时平均比能  $Z$  的极限。  
在一体积内的平均吸收剂量等于该体积内的平均比能  $Z$ 。

(5) 吸收剂量率  $D$ , 是  $dD$  除以  $dt$  所得的商, 其中:  $dD$  是在时间间隔  $dt$  内吸收剂量的增量。单位:  $\text{Jkg}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。

$$D = \frac{dD}{dt} \tag{55}$$

专名为戈瑞每秒 ( $\text{Gys}^{-1}$ )。

(6) 比释动能  $K$ , 是  $dE_{tr}$  除以  $dm$  所得的商, 其中:  $dE_{tr}$  是非带电粒子在质量为  $dm$  的物质中释出的所有带电粒子的初始动能之和。单位:  $\text{Jkg}^{-1}$ 。

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \tag{56}$$

专名为戈瑞 ( $\text{Gy}$ ),  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Jkg}^{-1}$ 。

① 能量为  $E$  的非带电粒子 (不包括静止能量), 能注量  $\Psi$  和注量  $\Phi$  与比释动能  $K$  之间的关系为:

$$K = \Psi \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) = \Phi \left[ E \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \right] \tag{57}$$

② 可以给出某特定物质在自由空间中或在另一种物质内一点的比释功能, 如自由空间中某一点的某一种物质的比释动能, 常见的如自由空气中组织比释动能。

③ 在剂量学中常用适当物质中的比释动能率来描述非带电粒子辐射场。

④ 在带电粒子平衡状态下, 当轭致辐射可忽略不计时, 比释动能与吸收剂量接近等值。

(7) 比释动能率  $K$ , 是  $dK$  除以  $dt$  所得的商, 其中:  $dK$  是在时间间隔  $dt$  内比释动能的增量。单位:  $\text{Jkg}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。

$$K = \frac{dK}{dt} \tag{58}$$

可用专名戈瑞 ( $\text{Gy}$ ) 代替焦耳每千克,  $1 \text{ Gys}^{-1} = 1 \text{ Jkg}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。

(8) 照射量  $X$ , 是  $dQ$  除以  $dm$  所得的商,  $dQ$  是在质量为  $dm$  的空气中, 由光子释放的全部电子 (负电子和正电子) 在空气中完全被阻止时, 在空气中产生一种符号的离子总电荷的绝对值。单位:  $\text{Ckg}^{-1}$ 。

$$X = \frac{dQ}{dm} \tag{59}$$

应废除的专用单位为伦琴 ( $\text{R}$ ),  $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ Ckg}^{-1}$ 。

① 由电子产生的轭致辐射被吸收后产生的电离不包括在  $dQ$  之中。照射量与空气比释动能的电离当量的差别就在于后者是将轭致辐射造成的电离包括在内, 但二者差别只在几个  $\text{MeV}$  以上才显著。

② 按现在的测量技术, 对光子能量在高于几个  $\text{MeV}$  或低于数  $\text{keV}$ , 照射量按定义复现是困难的。

③ 照射量的另一种定义形式是:

$$X = \Psi \frac{\mu_{en}}{\rho} \frac{W}{e} \tag{60}$$

式中:  $e$  为基本电荷,  $W$  为空气中形成一对离子所消耗的平均能量。

(9) 照射量率  $X$ , 是  $dX$  除以  $dt$  所得的商, 其中  $dX$  是在时间间隔  $dt$  内照射量的增量。单位:  $\text{Ckg}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。

$$X = \frac{dX}{dt} \tag{61}$$

2.2.4 放射性的量和单位 放射性物质在衰变中释放出电离辐射各种带电和不带电粒子, 因此放射性活度等的计量, 也是电离辐射剂量学的重要内容。

(1) [放射性] 活度  $A$ , 在一确定的时刻, 某一特定能态的一定量放射性核素的活度是  $dN$  除以  $dt$  所得的商, 其中:  $dN$  是在时间间隔  $dt$  内该放射性核素自发核跃迁数的期望值。单位:

$\text{s}^{-1}$ 。

$$A = \frac{dN}{dt} \tag{62}$$

活度单位的专名是贝可 [勒尔] ( $\text{Bq}$ ),  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ 。应废除的非法计量单位为居里 ( $\text{Ci}$ ),  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 。

(2) 衰变常数  $\lambda$ , 放射性核素在某一特定能态的衰变常数是  $dP$  除以  $dt$  所得的商, 其中:  $dP$  是在时间间隔  $dt$  内, 给定的原子核发生自发核跃迁的几率。单位:  $\text{s}^{-1}$ 。

$$\lambda = \frac{dP}{dt} \tag{63}$$

注:  $\text{Ln}2/\lambda$  称作放射性核素的半衰期, 符号为  $T_{1/2}$ , 就是一定量放射性核素的活度降至其初始值一半时所需的时间。

(3) 空气比释动能率常数  $\Gamma_\delta$  发射光子的放射性核素, 其空气比释动能率常数是  $I^2 K_\delta$  除以  $A$  所得的商, 其中:  $K_\delta$  是距离活度为  $A$  的发射光子的放射性核素的点状源  $\delta$  处, 由能量大于  $\delta$  的光子所造成的空气比释动能率。单位:  $\text{m}^2 \text{ Jkg}^{-1}$ 。

$$\Gamma_\delta = I^2 K_\delta / A \tag{64}$$

如以  $\text{Gy}$  和  $\text{Bq}$  表示单位则为  $\text{m}^2 \text{ GyBq}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , 以活度的专用单位  $\text{Ci}$  和比释动能的专用单位 ( $\text{rad}$ ) 来表示此常数时 (已废除单位),  $1 \text{ radm}^2 \text{ Ci}^{-1} \text{ s}^{-1} = (10^{-12}/3.7) \text{ m}^2 \text{ Jkg}^{-1}$ 。

注:  $\delta$  值的选择没有公认值, 多以  $\text{keV}$  表示。

2.2.5 放射防护中使用的量和单位 放射防护有关的量是电离辐射剂量学中的重要组成部分, 由于它关系到对人的健康量度, 因此为人们所重视。近年来放射防护剂量学已发展成辐射剂量学中的一个新的分支。但是放射防护量, 常常定义不严谨, 其中一些量又是不可测量的, 为此人们不断探索新的解决途径, 也不断提出新的概念, 这也使得放射防护的量很不稳定。而根本或主要的实质性缺陷并未得到解决。不过放射防护中所能接受的数值误差范围比较宽, 例如测量的年剂量在十分之一年限值以下时, 虽有 100% 的误差, 一般尚可接受。但不应该由此而认为不需明辨或正确理解所用的量。

近代放射防护量中较早出现的“基本”量是 ICRU 提出的剂量当量, 这个量是一个不可测量的“点”剂量。稍后为了区别有、无受体的量, 发展了剂量当量的“指数量”。此后又看到“指数量”也是不可测量, 并且是不可相加量, 于是又发展了“实用量”, 这个量可以较好的表达那些不可测的限值量, 并且不会做出对限值量的低估, 也不会出现过高的估。为此 ICRU 发表了三个新的实用量——周围剂量当量、定向剂量当量、个人剂量当量。与上述的进展同时, 对剂量当量增加了各种“附加术语”, 就形成了各种概念的放射防护量, 如: 器官剂量当量, 集体剂量当量, 待积剂量当量, 剂量当量负担, 有效剂量当量, 有效待积剂量当量, 集体有效剂量当量, 剂量当量指数, 深部剂量当量指数, 浅层剂量当量指数, 有白血病意义剂量当量, 有遗传意义剂量当量, 有躯体意义剂量当量, 人均有效剂量当量等。从以上可见, 这些量都是以剂量当量为基础。到九十年代初, 正当 ICRU 准备完成它的放射防护测量中的实用量之际, 国际放射防护委员会 (ICRP) 在其新建议书中推行了新提出的当量剂量体系, 它仍然是不可测量, 其基本量——当量剂量不再以点吸收剂量为基础, 而是以器官平均吸收剂量为基础, 再以较简易的辐射加权因子加权。剂量当量和当量剂量两个体系并非简单的换名, 而是概念上的调正。下面对这两个体系的主要量做一简要介绍。

(1) 剂量当量  $H$ , 是组织内某一点处的  $D$  和  $Q$  的乘积, 其中:  $D$  为吸收剂量,  $Q$  为品质因子。单位:  $\text{Jkg}^{-1}$ 。

$$H = DQ \tag{65}$$

专名为希 [沃特] ( $\text{Sv}$ ),  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Jkg}^{-1}$ , 应废除的非法计量

单位为雷姆(rem), 1 Sv= 100 rem。

① 剂量当量只限于在辐射防护中使用, 不能用它衡量大剂量的确定性效应(如放射病)。

②  $Q$  值早年(上世纪 50 年代)称为相对生物效率(RBE), ICRP 1950 年对 RBE 建议值(NBS Handbook 47, 1950)为: 镭  $\gamma$  射线(0.5 mm 铂过滤)、0.1~0.3 MeV  $X$  射线和  $\beta$  射线为 1.0, 质子和不超过 20 MeV 的快中子为 10  $\alpha$  射线为 20。ICRP 在 1954 年给出的 RBE 值为:  $X$  射线、正负电子及  $\beta$  射线为 1, 快中子, 能量小于 10 MeV 的质子和自然发生的  $\alpha$  粒子为 10 重反冲核为 20, 并给出平均比电离(在水中每  $\mu m$  的离子对数及水中传能线密度)与 RBE 对应关系, 这时将  $\alpha$  射线的 RBE 由 20 降为 10。1964 年 ICRP(ICRP, pub\*4)定义  $QF$  (品质因子)并将其与 RBE 分离。1977 年 ICRP(ICRP, pub, 26)给出调整后的品质因子( $Q$ ), 即将  $\alpha$  恢复为 20。1985 年 ICRP 巴黎会议声明指出中子的品质因子由 10 增加到 20, 1986 年 ICRU 第 40 号报告给出: 光子(能量大于 30 keV 的  $X \gamma$  射线)和大于 30 keV 电子的  $Q$  值取 1, 氦的  $\beta$  射线  $Q=2$  中子、质子和重粒子及  $\alpha$  粒子的  $Q=25$ 。1990 ICRP(ICRP, pub\*60)的当量剂量系统中的  $W_R$  见表 1。对不同能量中子也可按下式算出:

$$W_R=5+17e^{-\frac{1}{E}[1n(2E)]^2} \tag{66}$$

式中:  $E$  为中子能量(MeV)。对未包括在表 1 中各类型和能量的辐射可通过计算 ICRU 球模体 10mm 深的  $Q$  值近似代做  $W_R$  用。

$$Q=\frac{1}{D}\int_0^{\infty} Q(L)D(L)dL \tag{67}$$

式中:  $D(L)dL$  是 10 mm 处传能线密度为  $L$  至  $L+dL$  的吸收剂量,  $Q(L)$  为 10 mm 深  $L$  的品质因子。

$Q$  与  $W_R$  的差别除数值不同外,  $Q$  是以组织内某一点的吸收剂量用同一点的按电离辐射类型和能量应有的品质因子计权得出, 而当量剂量是以入射到身体表面电离辐射的类型和能量应有的计权因子( $W_R$ )计权某一器官或组织的平均吸收剂量得到。上述计算  $Q$  的公式虽然对  $Q$  与  $W_R$  表面上看是相同的, 但实质也不相同,  $Q$  是按组织内一个点实际存在的传能线密度分布算出, 而代  $W_R$  的  $Q$  是 ICRU 球模 10 mm 深的  $L$  谱相应的品质因子。

表 1  $W_R$  值

类型	$W_R$
所有能量光子	1
所有能量电子和 $\mu$ 介子	1
中子< 10 keV	5
10 keV~ 100 keV	10
100 keV~ 2 MeV	20
2 MeV~ 20 MeV	10
> 20 MeV	5
质子,> 2 MeV 的反冲质子	5
$\alpha$ 粒子, 裂变碎片, 重核	20

(2) 剂量当量率  $H$ , 是  $dH$  除以  $dt$  所得的商, 其中:  $dH$  是在时间间隔  $dt$  内剂量当量的增量。单位:  $Jkg^{-1}s^{-1}$ 。

$$H=\frac{dH}{dt} \tag{68}$$

专名希沃特(Sv)代焦耳每千克。1 Sv $s^{-1}$ = 1  $Jkg^{-1}s^{-1}$ 。

(3) 有效剂量当量  $H_E$ , 定义为:

$$H_E=\sum_L W_TH_T \tag{69}$$

式中:  $H_T$  为组织  $T$  的平均剂量当量,  $W_T$  为权重因子, 表示

全身受均匀照射时, 组织  $T$  发生随机效应的危险度与总危险度(全身均匀受照, 由辐射的单位剂量当量所致各种恶性疾患和严重遗传疾患的总值)的比率,  $W_T$  值由 ICRP 给出(见表 2), 其余组织由除表上所列组织以外, 接受剂量最高的其余五个器官或组织, 每一组织的  $W_T$  值为 0.05。

表 2  $W_T$  值(ICRP, pub. 60)

组织	$W_T$
性腺	0.20
红骨髓	0.12
结肠	0.12
肺	0.12
胃	0.12
膀胱	0.05
乳腺	0.05
肝	0.05
食道	0.05
甲状腺	0.05
皮肤	0.01
骨表面	0.01
其余	0.05

注: 为计算目的, 其余组织有肾、上腺、肌肠、上部大肠, 小肠、肾、肌肉、胰腺、肺、胸腺和子宫。若其余器官或组织中的一个高于给定的 12 个器官或组织, 则给其计权因子为 0.025, 剩下的 0.025 再均分与剩下的其余组织或器官。

(4) 剂量当量负担  $H_C$ , 由于某种决策或实践, 使特定的群体受到持续的照射, 平均每人的某一器官或组织受到的剂量当量率  $H(t)$  在无限长时间内的积分:

$$H_C=\int_0^{\infty} H(t)dt \tag{70}$$

(5) 有效剂量当量负担  $H_{E\cdot C}$ , 由于某种决策或实践而产生的有效剂量当量负担, 是指定的群体平均每人所受的有效剂量当量率  $H_{E(t)}$  在无限长时间内的积分:

$$H_{EC}=\int_0^{\infty} H_E(t)dt \tag{71}$$

(6) 集体剂量当量  $S$ , 是对给定辐射源照射的群体的总危险的一个量度:

$$S=\int_0^{\infty} H^{\circ} P(H)dH \tag{72}$$

式中:  $P(H)dH$  是接受来自给定源所产生的剂量当量在  $H$  到  $H+dH$  之间的人数。单位: 人 $\cdot$ Sv。

(7) 集体有效剂量当量  $S_E$ , 将集体剂量当量中的  $H$  换为  $H_E$ , 即得:

$$S_E=\int_0^{\infty} H_E^{\circ} P(H_E)dH_E \tag{73}$$

(8) 集体剂量当量负担  $S_C$ , 将剂量当量负担中的剂量当量率换为集体剂量当量率, 即得:

$$S_C=\int_0^{\infty} S(t)dt \tag{74}$$

(9) 集体有效剂量当量负担  $S_{E\cdot C}$ , 将有效剂量当量负担中的有效剂量当量率换为集体有效剂量当量率即得出:

$$S_{EC}=\int_0^{\infty} S_E(t)dt \tag{75}$$

(10) 待积剂量当量  $H_{50}$ , 是由于放射性物质摄入体内后 50 年内对组织所致累积剂量当量:

$$H_{50}=\int_0^{w+50} H(t)dt \tag{76}$$

式中： $H(t)$ 是由摄入放射性物质所致剂量当量率， $t_0$ 是摄入时刻。

(11)待积有效剂量当量  $H_{E, 50}$ ，将待积剂量当量率换为有效剂量当量率即得：

$$H_{E, 50} = \int_{t_0}^{t_0+50} H_E(t) dt \tag{77}$$

(12)当量剂量  $H_{T, R}$  定义为：

$$H_{T, R} = W_R \cdot D_{T, R} \tag{78}$$

式中： $W_R$ 为辐射计权因子， $D_{T, R}$ 为由辐射  $R$  所致组织  $T$  的平均吸收剂量。

当辐射场由不同类型、不同能量的辐射组成时

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T, R} \tag{79}$$

(13)有效剂量  $E$ ，定义为：

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \tag{80}$$

(14)下列各量都是以当量剂量替代剂量当量的量

①待积当量剂量  $H_T(\tau)$

$$H_{T, (\tau)} = \int_{t_0}^{t_0+\tau} H_T(t) dt \quad (\tau \text{ 为积分时间}) \tag{81}$$

②待积有效剂量

$$E(\tau) = \sum_T W_T \cdot H_T(\tau) \tag{82}$$

③(当量)剂量负担( $H_{C, T}$ )和有效剂量负担  $E_c$

$$H_{C, T} = \int_0^\infty H_T(t) dt \tag{83}$$

$$E_c = \int_0^\infty E(t) dt \tag{84}$$

2.2.6 外照射放射防护的三个实用量 由于放射防护的基本限值量(有效剂量当量或有效剂量及器官剂量当量或器官当量

剂量)都是不能直接测量的量，因此监测中要使用实用量；外照射放射防护中的实用量有：周围剂量当量、定向剂量当量、个人剂量当量。这些实用量一般是可以代表基本限值量(一般不会低估和过高的高估)，评价环境和个人受照，就可以用实用量做出，但大剂量的事故照射不可简单以实用量评估。

(1)周围剂量当量  $H^*(d)$ 。辐射场中某一点处的周围剂量当量是相应的齐向扩展场在 ICRU 球模体内与齐向扩展场方向相反的半径上，深度为  $d$  处产生的剂量当量。①扩展场是由实际的辐射场导出的一个假设的辐射场，在扩展场内的注量，角分布和能谱分布都与参考点处实际辐射场的值相同。②齐向扩展场的注量及能谱分布与扩展场相同，但注量是单向的。③具有各向同性响应，按本定义定度的仪器，可用于测量周围剂量当量(要求在探头尺度范围内辐射场是均匀的)。④推荐  $d=10\text{ mm}$ ， $H^*(d)$  写做  $H^*(10)$ 。⑤周围剂量当量用在环境和场所监测强贯穿辐射。

(2)定向剂量当量  $H'(d)$ ，辐射场中某一点处的定向剂量当量是相应的扩展场在 ICRU 球模体内、指定方向的半径上，深度为  $d$  处产生的剂量当量。①推荐  $d=0.07\text{ mm}$ ， $H'(d)$  写为  $H'(0.07)$ 。②定向剂量当量用在环境和场所监测弱贯穿辐射。

(3)个人剂量当量  $H_p(d)$ ，个人剂量当量是人体上某一指定点下面某一适当深度  $d$  处软组织的剂量当量。①对强贯穿辐射，推荐  $d=10\text{ mm}$ ， $H_p(d)$  写为  $H_p(10)$ ；对弱贯穿辐射，推荐  $d=0.07\text{ mm}$ ， $H_p(d)$  写为  $H_p(0.07)$ ；对眼晶体， $d=3\text{ mm}$ ， $H_p(d)$  写为  $H_p(3)$ 。②可用佩戴在人体表面，用适当厚度的组织等效材料(或代用品)罩在探测器上来测量强贯穿辐射场中的个人剂量当量。

## 继续教育试题(2005—02)

单位：\_\_\_\_\_ 姓名：\_\_\_\_\_ 学员注册号：\_\_\_\_\_  
性别：\_\_\_\_\_ 年龄：\_\_\_\_\_ 学历：\_\_\_\_\_ 职称：\_\_\_\_\_ 现从事专业：\_\_\_\_\_

1. 辐射学的量有哪些？单位是什么？请分别列出。

2. 剂量学的量有哪些？单位是什么？请分别列出。

3. 什么是放射性活度？其单位的专用名称是什么？
4. 什么是剂量当量？其专用名称是什么？

5. 什么是当量剂量？什么是有效剂量？

6. 什么是个人剂量当量？

## 关于 2005 年开办继续教育项目的通知

各单位管理及专业技术人员：

为了提高基层辐射卫生监督管理人员和放射工作人员的业务水平，本刊于 2005 年开办由中华预防医学会批准的继续教育项目。该项目以刊授形式进行，即学习完 2005 年全年杂志(4 期)中的有关继续教育内容并考试合格者，可获得国家 II 类学分 12 分，正式批复已于 2005 年 1 月份下达。欢迎各单位相关人员踊跃报名参加。通知如下：

一、项目内容：①辐射卫生领域相关法律体系及防护标准。②放射源管理及放射事故处理。③电离辐射设备防护技术。④辐射生物学效应及剂量重建等。

二、答题：每期刊发考试题，学员须将每一期考试题剪下与答案一并在当期发行之日起 2 个月内寄回编辑部。考试题复印或誊抄无效。

三、学分证书：学员学习一年(共 4 期杂志)，按时寄回考试题答案且合格者，可获得国家 II 类学分 12 分。本刊负责将中华预防医学会颁发的继续教育学分证书寄给每位学员。

四、欲参加学习者，从即日起开始报名。请通过邮局将报名费 60 元(含全年四期杂志及继续教育学分证书工本费)汇至“中国辐射卫生杂志编辑部”收，请注明“继续教育费用”。务必将学员姓名、单位、地址、邮编填好，以便我们寄送杂志、证书及发票。

联系人：宁尚义 电话：0531—82919955