

# 辐射防护剂量学最新进展

中国医学科学院放射医学研究所 (天津, 300192) 张良安

**摘要:**重点介绍1980年ICRU第33号报告以来辐射防护剂量学的进展情况。文章除描述了与限制量有关的辐射量的进展外,主要介绍了用于外辐射的实用量,周围剂量当量、定向剂量当量和人员剂量当量的定义、测量方法及刻度方法等。

**关键词:**辐射防护 剂量学 实用量

从1895年伦琴发现X射线开始,人类从各类辐射中得到了巨大的好处。当然,人们在取得辐射利益的同时,也越来越认识到辐射有可能给人类带来潜在的危害,从而发展了辐射防护剂量学这门学科。在伦琴发现X射线100周年纪念的日子里,为了怀念这位伟大的科学家,本文将重点回顾1980年国际辐射单位及测量委员会(ICRU)第33号报告<sup>[1]</sup>以来,辐射防护剂量学的最新进展。

多年来,用在辐射防护中的一些量的讨论一直在进行,直到1985年ICRU在第39号报告中引进了适用于外辐射源的辐射场和个人剂量当量评价的一组实用量<sup>[2]</sup>后,这类讨论才告结束。1988年ICRU第43号报告<sup>[3]</sup>和1992年ICRU第47号报告<sup>[4]</sup>中公布了这组量的另外一些信息。1991年ICRP的第60号出版物<sup>[5]</sup>中,引进了限制量体系的新公式,为此1993年ICRU又发表了第51号报告<sup>[6]</sup>,这个报告主要涉及与测量和计算限制量有关的辐射量。

## 1 与限制量有关的辐射量

### 1.1 平均吸收剂量

一般的吸收剂量和品质因子与身体的部位和辐射场方向有关,这种量无法与常用限制量发生关系,为此ICRU建议用某器官的平均吸收剂量和品质因子。在特定的组织或器官中,其平均吸收剂量 $D_T$ 由下式计算:

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D dm \quad (1)$$

其中 $m_T$ 是组织或器官的质量, $D$ 是质量元 $dm$ 的吸收剂量。

在外辐射源的情况下,特定组织或器官的平均吸收剂量与周围辐射场及人体在辐射场中的大小及取向有关。特定器官的平均吸收剂量通常称之为器官剂量。

### 1.2 平均品质因子

在特定组织或器官中,其平均品质因子 $Q_T$ 由下式计算:

$$Q_T = \frac{1}{m_T D_T} \int_{m_T} Q D dm \quad (2)$$

其中 $Q$ 代表质量元 $dm$ 的品质因子。

$Q_T$ 与所考察器官内的辐射类型和能量有关。因而,在外照射情况下,特定组织或器官的 $Q_T$ 与周围辐射场及人体在辐射场中的大小及取向,以及所考察的器官或组织有关。在通常情况下,所考察区域的辐射能谱是未知的,1986年ICRU建议的常规平均品质因子 $\bar{Q}$ 可用作任何器官的 $Q_T$ 的近似值<sup>[7]</sup>。

1991年,ICRP新建议书中的辐射权重因子 $w_R$ 与 $\bar{Q}$ 的作用类似,ICRP按照辐射类型和能量列出了 $w_R$ 的值。这个值适用于内照射,在辐射防护中,大多数情况下,应用 $\bar{Q}$ 和 $w_R$ 作为其近似值是可以的,但这些概念不能用于量的推导体系及精确计算中。

### 1.3 限制量体系的量

ICRP在第26号出版物中建议的限制量是器官剂量当量和有效剂量当量<sup>[8]</sup>。器官剂量当量是特定组织或器官的平均剂量当量,通常用 $Q_T D_T$ 的乘积来表征。有效剂量当量

$H_E$  用下式估算:

$$H_E = \sum_T w_T D_T Q_T, \text{ 及 } \sum_T w_T = 1 \quad (3)$$

其中  $w_T$  是相关组织或器官(T)的组织权重因子。

精确计算  $H_E$  时,需知吸收剂量按线性能量转移的分布及函数。在通常的辐射防护中,并不需要这样的计算,而是用下面将介绍的实用量的测量结果对其进行评价。

1991年ICRP基于辐射权重因子这一概念,建议了两个新的量来分别代替器官剂量当量和有效剂量当量,它们是当量剂量和有效剂量<sup>[5]</sup>。

组织或器官的当量剂量  $H_T$  用下式计算:

$$H_T = \sum_R w_{R,T} D_{T,R} \quad (4)$$

其中  $D_{T,R}$  是辐射分量 R 在一个组织或器官中引起的平均吸收量。

有效剂量  $E$  用下式计算:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (5)$$

等式(5)也可写为:

$$E = \sum_T w_T D_T \sum_R (D_{T,R}/D_T) w_R \quad (6)$$

$D_{T,R}$  很难用实验方法确定,因而这些量不能用作基本的测量量。

## 2 用于外辐射的实用量

### 2.1 实用量的定义

#### 2.1.1 周围剂量当量 [ $H^*(d)$ ]

辐射场中,某一点的  $H^*(d)$ ,是在相应的扩展和齐向场中,在ICRU球内与齐向场方向相反的半径上,其深度为  $d$  处的剂量当量。其单位为  $J \cdot kg^{-1}$ ,其单位的专用名为希沃特(Sv)。应注意的是, $H^*(d)$  的表述应包括参考深度  $d$ 。为简化符号, $d$  可以用 mm 为单位的量来表示。对强贯穿辐射,常用 10mm 这个深度,因而此时周围剂量当量可表示为  $H^*(10)$ 。对弱贯穿辐射,其皮肤深度为 0.07mm,眼晶体深度为 3mm,这样可分别表

示为  $H^*(0.07)$  和  $H^*(3)$ 。

测量  $H^*(d)$  要求辐射场在测量仪器的范围内是均匀的,并要求仪器应是各向同性的。

#### 2.1.2 定向剂量当量 [ $H'(d, \Omega)$ ]

辐射场中,某一点的  $H'(d, \Omega)$ ,是在相应扩展场中,ICRU球内其特定方向  $\Omega$  的半径上,深度为  $d$  处的剂量当量。其单位为  $J \cdot kg^{-1}$ ,单位的专用名为希沃特(Sv)。应注意的是,表述  $H'(d, \Omega)$  应有参考深度  $d$  和方向  $\Omega$  的说明。为表示简单, $d$  可以用 mm 为单位的量来表示。对弱贯穿辐射,皮肤和眼晶体的定向剂量当量可以分别表示为  $H'(0.07, \Omega)$  和  $H'(3, \Omega)$ 。对强贯穿辐射,深度常用 10mm,可表示为  $H'(10, \Omega)$ 。

测量  $H'(d, \Omega)$  要求辐射场在测量仪器范围内是均匀的,并要求仪器具有特定的方向响应。为说明方向  $\Omega$ ,要求选定一个参考的坐标系统,在此系统中  $\Omega$  可以表述出来(例如用极角或方位角)。该系统的选择常依赖于辐射场。

在单向辐射场情况下,方向可以用入射场反方向的半径与特定方向(半径)间的夹角  $\alpha$  来描述。当  $\alpha=0$  时,  $H'(d, \Omega)$  可以写为  $H'(d)$ ,并且等于  $H^*(d)$ 。对弱贯穿辐射,测定组织当量材料平板中适当深度的剂量当量仪器,如果平板表面垂直于  $\Omega$ ,这时可用来确定  $H'(0.07, \Omega)$  和  $H'(3, \Omega)$ 。

#### 2.1.3 人员剂量当量 [ $H_p(d)$ ]

$H_p(d)$  是在身体表面下,深度  $d$  点软组织的剂量当量。其单位为  $J \cdot kg^{-1}$ ,专用名为希沃特(Sv)。表述  $H_p(d)$  应有参考深度  $d$  的说明,为表示简单, $d$  可以用 mm 为单位表示。对弱贯穿辐射,皮肤和眼晶体的  $H_p(d)$  分别为  $H_p(0.07)$  和  $H_p(3)$ 。对强贯穿辐射,深度为 10mm,表示为  $H_p(10)$ 。

$H_p(d)$  是用一个佩带在身体表面的个人剂量计来测量的量,这种剂量计有一个探测器,并在探测器上覆盖了一个适当厚度的组

织等效材料。

## 2.2 测量实用量的仪器

### 2.2.1 场所测量仪器

#### 2.2.1.1 强贯穿辐射测量仪器

为测量所有辐射条件下的  $H^*(d)$ , 仪器不但应具有各向同性的角度响应, 同时还应具有 ICRU 球的反向散射特征。把一个探测器放在一个球内是达不到此目的的, 因球内的相互作用就造成非各向同性响应。在实际应用中, 是选择一个近似的各向同性的仪器, 用不同方法来调整能响函数, 去模拟球内的吸收和散射对能量响应的影响。

对光子, 用作测量  $H^*(d)$  的仪器的能响函数与测量照射量的仪器不同, 在能量大于 0.2MeV 时差异不大, 但在低于此值时, 散射光子就越来越重要, 从而增加了二者响应之间的差异, 因为  $H^*(d)$  还含有 ICRU 球的散射。在这种情况下,  $H^*(d)$  与照射量的商最高可达  $1.6 \times 10^{-2} \text{Sv} \cdot \text{R}^{-1}$  (约在 80keV 时)。能量更低时, ICRU 球 10mm 组织等效材料的减弱也变得越来越严重, 这种作用可能导致  $H^*(d)$  与照射量的商减少, 例如在 21keV 时, 其值为  $0.6 \times 10^{-2} \text{Sv} \cdot \text{R}^{-1}$ 。一些测照射量的仪器的电离室壁是高原子序数材料, 在 100keV 以下, 由于光电吸收而造成仪器的超响应, 这也与减弱的效应类似。从而, 仪器的这种响应实际显示出测量  $H^*(10)$  比测照射量的能量响应小。因而, 现有的很多仪器可直接用来测量周围剂量当量率。

对光子辐射, 在很宽的能量范围, 当前仪器已能用足够的精度来测定  $H^*(d)$ 。这在新仪器设计时也不会带来更多的问題。

应很好选择用来模拟 10mm 组织层减弱和能量响应及模拟一个组织等效球的反向散射作用的材料。另外附加一个使其电子平衡的材料是不适当的。一些探测器, 例如 GM 管和有效原子序数高的探测器也容易更适合用来测定新的实用量, 它们的能量问题很容易用滤片修正。

#### 2.2.1.2 弱贯穿辐射测量仪器

在一个单向的辐射场中, 用来测量  $H'(0.07, \alpha)$  的仪器读数将随辐射的入射方向而变化。从后半球方向的辐射入射, 其读数为 0。前半球方向入射, 当仪器转动时, 读数随角度变化, 这个变化与  $H'(0.07, \alpha)$  和注量之商的变化一致。这种变化主要来自两个原因: 0.07mm 组织层的减弱和反向散射随角度的变化。后者对  $\beta$  辐射来说比对低能光子更为重要。在单向场中,  $H'(0.07, \alpha)$  的角度响应随辐射类型和能谱而变化。

由于常遇到的  $\beta$  射线在组织中的射程与 ICRU 球的半径比较是非常小的, 因而从球和一个足够厚的平板来的方向散射差异不大。在一个非常薄的、平面的组织等效探测器上放一个 0.07mm 厚的组织等效吸收块, 下部用一个与组织有相同反向散射特征的厚层塑料包上, 就可用来测量  $\beta$  射线的  $H'(0.07, \alpha)$ 。实际上多用外推电离室来作为标准测量。

在原来的弱贯穿辐射测量中, 测定组织等效吸收体中特定深度吸收剂量率的仪器都可用来测量定向剂量当量率, 无需作大的改变。

在新的实用量测定中, 若一个测  $\gamma$  射线的仪器又用作测定  $\beta$  射线, 则势必会对  $\beta$  射线测定带来很大的误差。测定  $\beta$  射线的新型仪器应进一步研究。

这种仪器应有一个  $7\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$  窗, 探测元件应十分薄, 薄到相当于几个 mm 厚的空气, 其仪器体积也应小, 若窗的直径与电离室的深度之比较大, 随  $\beta$  射线入射方向引起的  $H'(d, \Omega)$  方向响应的变化而造成窗周围的边缘效应并不严重。反之, 应考虑边缘效应。

#### 2.2.2 个人剂量计

如原来个人剂量计上覆盖的组织等效吸收体的厚度分别为 0.07、3 和 10mm, 则可以直接用来测量  $H_P(d)$ 。

近年来, 由于采用了几乎组织等效的热

释光探测器,使个人剂量计的设计大为简化。只要在这类探测器上覆盖一个适当厚度的组织等效吸收板,可以作成在能量和角度响应上都十分理想的剂量计,但大多数用来测量 $H_p(0.07)$ 的剂量计,其主要缺陷是敏感元件太厚。

用组织不等效的敏感元件做成剂量计(如照相胶片)也可用来测量 $H_p(d)$ 。在这种情况下,一个或多个滤片可以用来改进能响,但对不同方向的辐射很难保证其能响不变化,这一问题对低能光子特别重要。

测量比释动能时所用的有准确能响的胶片和热释光剂量计,只需稍加修正后可测定 $H_p(10)$ 。由于胶片和热释光剂量计大多是平的,它在一个适当厚度的组织等效材料下的响应几乎是同性的,因而无需为角度响应进行修正。但对圆锥形剂量计不属此种情况,圆锥形剂量计对注量是各向同性的,对人员剂量当量的响应却不是各向同性的。虽然引入的误差并不过分,但在设计仪器时应考虑这一问题。

需进一步研制薄型的剂量计,使之有更理想的能量响应。将来的剂量计应有一个适当厚度和塑料材料的组份。对于小的探测元件,应特别重视边缘效应。

## 2.3 刻度问题

### 2.3.1 一般问题

按ICRU第39号报告的建议,所有仪器的刻度都应用新的实用量。凡过去按照射量或比释动能等刻度的仪器都必须重新进行刻度。另一方面,在选择新的量时,一个重要的考虑是,当前流行的仪器不论是刻度程序或应用都应尽可能地只作小的改变而继续使用,这种考虑一般能达到。

### 2.3.2 场所(环境)监测器

场所监测器,对强贯穿辐射应用 $H^*(d)$ 进行刻度,对弱贯穿辐射应用 $H'(d, \Omega)$ 进行刻度。常用的 $\beta$ 发射体是重要的弱贯穿外照射源,因而, $\beta$ 射线的场所监测器应用定向剂

量当量刻度。

### 2.3.2.1 X和 $\gamma$ 射线

由于将能量 $>15\text{keV}$ 的光子都视为强贯穿辐射,因而大多数X和 $\gamma$ 射线场都应用 $H^*(d)$ 刻度。然而对比这个能量低的辐射,应使用 $H'(d, \Omega)$ ,当前 $d$ 的建议值为 $0.07\text{mm}$ 。

当前流行的X和 $\gamma$ 射线场所监测器多被设计用来测照射量,少数用来测量空气比释动能。光子能量在 $2\text{MeV}$ 以下时,照射量只须乘以34就可在 $0.5\%$ 的精度内转化为空气比释动能。空气比释动能转换为 $H^*(10)$ 的转换因子是光子能量的函数,其值列在表1中。强贯穿辐射中,周围剂量当量的刻度可用空气比释动能刻度的相同程序,但此时要求刻度的能量范围应在 $30\sim 300\text{keV}$ 之间。这并不是一个严重的问题,事实上,当前使用的很多仪器对 $H^*(10)$ 的响应精度比对空气比释动能高。

### 2.3.2.2 $\beta$ 射线和电子

对通常应用的 $\beta$ 射线源,感兴趣的量是 $H'(d, \Omega)$ ,但对能量大于 $2.5\text{MeV}$ 的电子, $H^*(d)$ 却更为重要。

很多 $\beta$ 射线场所监测器是在 $7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 组织等效材料下用吸收剂量对读数进行刻度的,这相当于用 $H'(0.07)$ 刻度。刻度过程中的吸收剂量率,既可以用标准几何条件下的次级标准源给出,也可以用前窗为 $7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的外推电离室测量。后者是测水中或组织中吸收剂量率的最基本的绝对测量设备,也可用于剂量当量率测量。

日常刻度应在垂直入射的条件下进行。当进行例行实验时,应当应用一个标准刻度源对设备的角度响应进行研究。

### 2.3.3 个人剂量计的刻度

在用 $H_p(d)$ 刻度个人剂量计时,要求把剂量计放在体模上,用以模拟剂量计佩带在身体上时所受到的反向散射。ICRU球是一个模拟人体躯干的实用体模,但应用ICRU

表1 空气比释动能K、照射量(X)和注量(φ)到H\*(10)和H'(0.07)的转换系数

光子能量 keV	H*(10)/φ pSv·cm <sup>2</sup>	H*(10)/K <sub>a</sub> Sv·Gy <sup>-1</sup>	H*(10)/X cSv·R <sup>-1</sup>	H'(0.07)/φ pSv·cm <sup>2</sup>	H'(0.07)/K <sub>a</sub> Sv·Gy <sup>-1</sup>
10	0.077	0.0103	0.0091	7.1	0.95
15	0.85	0.271	0.237	3.10	0.99
20	1.00	0.60	0.521	1.76	1.05
30	0.79	1.10	0.96	0.88	1.22
40	0.63	1.47	1.29	0.60	1.41
50	0.54	1.67	1.46		
60	0.50	1.74	1.52		
80	0.53	1.72	1.51		
100	0.61	1.65	1.44		
150	0.89	1.49	1.31		
200	1.20	1.40	1.22		
300	1.80	1.31	1.14		
400	2.38	1.26	1.10		
500	2.93	1.23	1.08		
600	3.44	1.21	1.06		
800	4.38	1.19	1.04		
1000	5.2	1.17	1.03		
1500	7.0	1.15	1.01		
2000	8.6	1.14	1.00		
3000	11.2	1.13	0.99 <sup>a</sup>		

a: 因为光子能量大于3MeV后难以达到电子平衡,故无法精确测定照射量

球却也存在一些问题,主要是制作困难、难于找到与ICRU球4种元素含量一致的材料、同时最多只能刻度一个剂量计和对比较大的剂量计无法刻度。

当前,应用一组ICRU球的转换因子还是较为方便,由于上述问题,其它体模也常用来作H<sub>p</sub>(d)的刻度。为了刻度一致,ICRU建议用30cm×30cm×15cm的PMMA体模,其质量接近ICRU球,对光子和中子而言,反向散射特征十分接近人体的结果。30cm×30cm的面对同时辐照几个剂量计已可满足,但在离刻度点源的距离为50~75cm时,表面上均匀辐射场的面积还是不太大。这种体模制作容易、造价低、使用方便。应注意的是,在监测肢体时,用较小的体模较为合理。

参 考 文 献

1 ICRU. Radiation quantities and units. ICRU Report 33. Bethesda, 1980

2 ICRU. Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources. ICRU report 39. Bethesda, 1985

3 ICRU. Determination of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. Bethesda, 1988

4 ICRU. Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations. ICRU Report 47, Bethesda, 1992

5 ICRP. 1990 Recommendations of the ICRP. Publication 60. Annals of the ICRP 21 (1-3). New York: Pergamon Press, 1991

6 ICRU. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report 51. Bethesda, 1993

7 ICRU. The quality factor in radiation protection, ICRU Report 40. Bethesda, 1986

8 ICRP. Recommendations of the ICRP. Publication 26. Annals of the ICRP (1-3). New York: Pergamon Press, 1991

(收稿日期:1995-05-11)