

《β 射线所致皮肤剂量估算规范》释疑

张良安 张文艺 焦玲 丁艳秋

【摘要】 国家职业卫生标准——《β 射线所致皮肤剂量估算规范》已经卫生部批准并发布。此标准是在广泛调研国内外文献、系统学习相关法律法规和进行一些方法验证的基础上制定的。此标准主要用于 β 射线皮肤污染所致的皮肤剂量估算，对皮肤辐射损伤的诊断和 β 射线皮肤污染的去污处理都有指导意义。该文对标准的主要内容及关键性技术进行了释疑。

【关键词】 β 射线；皮肤；辐射剂量；职业卫生标准

Explanation of Specifications of Skin Dose Estimation from β Ray Exposure ZHANG Liang-an, ZHANG Wen-yi, JIAO Ling, DING Yan-qiu. Tianjin Key Laboratory of Molecular Medicine, Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Sciences, Tianjin 300192, China

Corresponding author: ZHANG Liang-an, Email: zhangla43@yahoo.com.cn

【Abstract】 National occupational health standard—*Specifications of Skin Dose Estimation from β Ray Exposure* has been approved and issued by Ministry of Health of the People's Republic of China. The standard was enacted based on the extensive research of literature, systematic study of the relevant laws and regulations, technology methods validation. It is mainly used for skin dose estimation caused by β ray radioactive skin contamination. The related contents and key technology of this criteria were interpreted in this article.

【Key words】 Beta rays; Skin; Radiation dosage; Occupational health criteria

1 目的和背景

核事故有可能造成表面污染，非密封型的放射性工作场所也有可能造成表面污染。当纯 β 衰变的核素造成皮肤污染时，有可能引起皮肤的辐射损伤，本标准主要用于这种情况下所致皮肤剂量的估算，对皮肤辐射损伤的诊断和 β 射线皮肤污染的去污处理都有指导意义，制定 β 射线所致皮肤剂量估算规范十分必要。2011 年，受卫生部委托，中国医学科学院放射医学研究所张良安研究员等起草了这一国家标准。在标准的起草过程中主要参考了国际原子能机构、国际辐射防护委员会和国际辐射单位与测量委员会等机构的相关标准和建议^[1-8]。

2 基础和依据

1999 年，国际原子能机构^[1]明确指出，皮肤污

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2012.04.011

基金项目：卫生部行业基金（201002009）；卫生部标准研究课题（2009-09-05）

作者单位：300192 天津，中国医学科学院放射医学研究所，天津市分子核医学重点实验室

通信作者：张良安(Email: zhangla43@yahoo.com.cn)

染监测和皮肤剂量估算的主要目的是：①确定污染是否符合剂量限值，尤其是要确保避免发生确定性效应；②在过量照射的情况下，启动和(或)支持任何适当的医疗检查和干预行动。在利用 β 射线污染监测值估算皮肤剂量中，应考虑以下的问题：①应考虑皮肤的剂量限值，国际放射防护委员会建议将这个限值定为 500 mSv/a，由于一般情况下是某一皮肤面积受到污染，因此这个值应是针对 1 cm² 面积的平均值。皮肤剂量估算中测量的名义深度为 0.07 mm (7 mg/cm²)。②β 射线皮肤污染通常都不是均匀的，而往往发生在身体的某一部位，特别是手部。为便于日常的污染控制，一般应考虑 100 cm² 污染面积的平均污染。因此，日常监测应是对 100 cm² 污染面积的平均值进行检测。在大多数皮肤污染检测中，只需要判断其是否符合(污染)剂量限值。在不超剂量限值时，一般不需要估算皮肤剂量；但是，持续污染或一开始污染就很高时就应进行皮肤剂量的估算。在这种情况下，应估算 1 cm² 面积污染皮肤的平均值。这类估算通常是极其不准确的，特别是污染物的辐射被皮肤表层以下吸收的情况，其不确定度差异达两个数量级的情况并不少见，因

此, 这样的估算可以认为是定性的评估, 并且应与一般的外照射分别考虑。然而, 在进行当量剂量估算时, 如果当量剂量超过污染剂量限值的 1/10, 则应在个人剂量档案中记录。值得注意的是, 一些表面污染也有可能转移到体内, 引起内照射。③当出现“热粒子”照射的情况时, 在离放射源 1 mm 内的照射也是很均匀的。当判断是否满足剂量限值为主要目标时, 国际辐射防护委员会指出此时应关注急性溃疡。为防止急性溃疡的发生, 这就要求在几个小时内传递给 1 cm² 面积的皮肤下, 其深度为 10~15 mg/cm² 处的剂量应低于 1 Sv。在工作场所内环境辐射场的热粒子可能很难检测, 这是因为热粒子产生的辐射具有特别明显的局部特征。对可能产生热粒子的情况要加强判别和控制。

3 内容解读

3.1 β 射线所致皮肤剂量估算的基本方法

在本标准中, 推荐采用 β 注量进行皮肤剂量估算这一基本方法, 即:

$$D_s = C_{s0} \cdot \theta \quad (1)$$

式中, D_s : β 射线所致皮肤剂量, 单位为 pGy; C_{s0} : β 射线注量到皮肤剂量的转换系数, 单位为 pGy·cm², 在 β 射线垂直于人体长轴(Z 轴)从人体正面入射时, 其值可以从表 1 中查到^[2]; θ : β 射线注量, 单位为 cm⁻²。

在本标准中, 还推荐了采用 β 注量进行有效剂量估算的方法, 即:

$$E = C_{E0} \cdot \theta \quad (2)$$

式中, C_{E0} : β 射线注量到有效剂量的转换系数, 单位为 pSv·cm², 其值可从表 2 中查到^[2]; θ : β 射线注量, 单位为 cm⁻²。

从以上的讨论可以看出, 不论是估算皮肤剂量, 还是估算有效剂量, 关键是如何得到 β 射线

的注量。

3.2 β 射线的注量的确定

在 β 射线的皮肤剂量估算中, 通常有 3 种方法确定注量, 即已知 β 源活度确定注量、用表面污染仪测量结果确定注量和用定向剂量当量的测量结果确定注量。

3.2.1 已知 β 源活度确定注量的方法

若已知一个放射源的放射性活度 A, 当源的自吸收可以忽略, 而且 4π 方向的发射是各向同性时, 则污染平面的注量可用公式(3)计算:

$$\theta = \frac{0.5 \times A \times t}{S} \quad (3)$$

式中, θ : 注量, 单位为 cm⁻²; A: 敷贴治疗源的放射性活度, 单位为 Bq; t: 累积照射时间, 单位为 s; S: 污染面积或敷贴治疗面积, 单位为 cm²; 0.5: 考虑仅 2π 方向向皮肤入射。

3.2.2 用表面污染仪测量结果确定注量的方法

这种情况下用公式(4)确定注量:

$$\theta = 0.5 \times \eta \times A_s \times t \quad (4)$$

式中, A_s : 用 β 表面污染仪测量的污染表面的平均比活度, 单位为 Bq/cm²; η : β 表面污染仪的探测效率, 一般当探测器端面与污染表面的距离很近时, 可近似地取 $\eta=1$ 。

用表面污染仪测量时, 应采用 Bq/cm² 显示模式, 可直接测量污染表面的平均比活度。当测量结果是每秒计数时, 可用污染探测仪的面积除以测量结果, 估算出以 Bq/cm² 为单位的值。在测量中应注意对探测器的探测效率、探测面积和离污染表面的距离作相关修正。

3.2.3 用定向剂量当量测量结果确定注量

这种情况下用公式(5)确定注量:

$$\theta = C_{H0} R(d, \alpha) H^-(d, 0^\circ) \quad (5)$$

式中, θ : β 射线辐射场注量, 单位为 cm⁻²;

表 1 不同能量单能 β 射线垂直于人体长轴(Z 轴)从人体正面入射时, 注量到皮肤剂量的转换系数

能量(MeV)	0.100	0.200	0.300	0.400	0.600	1.00	1.20	1.50	2.00	4.00	10.0
C_{s0} (pGy·cm ²)	8	39	80	98	171	164	162	158	153	150	165

注: 表中, C_{s0} 为 β 射线注量到皮肤剂量的转换系数。

表 2 不同能量单能 β 射线垂直于人体长轴(Z 轴)从人体正面入射时, 注量到有效剂量的转换系数

能量(MeV)	0.100	0.200	0.300	0.400	0.600	1.00	1.20	1.50	2.00	4.00	10.0
C_{E0} (pSv·cm ²)	0.10	0.26	0.65	1.0	1.5	2.7	4.0	5.9	11	44	131

注: 表中, C_{E0} 为 β 射线注量到有效剂量的转换系数。

C_{H0} : 定向剂量当量到注量的转换系数, 单位为 $\text{GSv}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 其值可从表 3 查到^[2]; $R(d, \alpha)$: 探测器窗的厚度为 $d(\text{mm})$ 、角度为 $\alpha(^{\circ})$ 时的角度依赖因子修正因子, 其中 $d=0.07 \text{ mm}$ 或 $d=3 \text{ mm}$, 当 $\alpha=0^{\circ}$ 时, $R(d, 0^{\circ})=1$; α 为其他值时, $R(d, \alpha)$ 可从标准的附录 C 中查出; $H'(d, 0^{\circ})$: 探测器窗的厚度为 $d(\text{mm})$, 垂直入射到探测器灵敏体积测得的定向剂量当量, 单位为 Sv , 其中 $d=0.07 \text{ mm}$ 或 $d=3 \text{ mm}$, 目前 $d=0.07 \text{ mm}$ 的情况较多。

表 3 β 射线垂直于人体长轴(Z轴)从人体正面入射时, 不同能量单能电子定向剂量当量到注量的转换系数

能量(MeV)	$\emptyset/H'(d, 0^{\circ})(\text{GSv}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$	
	$\emptyset/H'(0.07, 0^{\circ})$	$\emptyset/H'(3, 0^{\circ})$
0.07	4.529	-
0.08	0.947	-
0.09	0.655	-
0.10	0.602	-
0.1125	0.615	-
0.125	0.661	-
0.15	0.814	-
0.20	1.199	-
0.30	1.845	-
0.40	2.198	-
0.50	2.481	-
0.60	2.732	-
0.70	2.907	0.000
0.80	3.040	22.22
1.00	3.205	3.322
1.25	3.378	2.058
1.50	3.484	1.908
1.75	3.546	1.953
2.00	3.584	2.079
2.50	3.597	2.398
3.00	3.623	2.681
3.50	3.650	2.849
4.00	3.676	2.994
5.00	3.690	3.155
6.00	3.690	3.236
7.00	3.690	3.268
8.00	3.690	3.279
10.00	3.636	3.300

注: 表中, \emptyset : β 射线辐射场注量; $H'(d, 0^{\circ})$: 探测器窗的厚度为 $d(\text{mm})$, 垂直入射到探测器灵敏体积测得的定向剂量当量; “-”表示无取值。

4 关键技术说明

4.1 计算中使用的模型和模体

在本标准中使用的转换系数, 均来自国际辐射防护委员会 74 号出版物^[2]。该出版物在计算皮肤剂量和有效剂量转换系数时采用的是美国核医学会医学内照射剂量委员会男性和女性模体。在计算皮肤剂量时, 使用的皮肤模型是: 第一层是表层, 厚 0.07 mm , 这代表辐射非灵敏层; 第二是灵敏层, 厚 1.93 mm ; 第三层是组织层, 厚 20 mm 。这样在皮肤剂量计算中, 计算的是灵敏层(第二层)的剂量, 在计算皮肤剂量、眼晶体剂量和定向剂量当量时, 应考虑这一情况。在定向剂量当量计算中一般使用板模, 这种模体由组织等效材料组成, 按国际辐射单位与测量委员会的建议, 这种模体有 3 种厚度, 分别是 0.07 、 3 和 10 mm 。

4.2 转换系数分析

图 1 给出了皮肤剂量、定向剂量当量、有效剂量随电子能量的变化曲线(电子能量在 10 MeV 以下)。电子能量在 10 MeV 以下时, 有效剂量和皮肤剂量都随电子能量的增加而增加。电子能量在 1 MeV 以下时, 有效剂量十分小, 而且皮肤剂量是有效剂量的主要贡献者(75%以上)。实际在电子能量低于 1 MeV 的情况下, 没有必要估算有效剂量, 仅需估算皮肤剂量就可以了。

当电子能量低于 10 MeV 时, 一般没有必要考

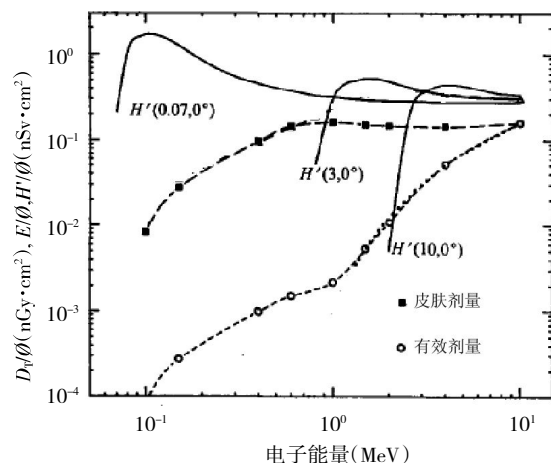


图 1 电子能量在 10 MeV 以下时, 皮肤剂量、有效剂量、定向剂量当量随电子能量的变化曲线图 图中, D/\emptyset 为: 注量到器官剂量的转换系数; E/\emptyset 为: 注量到有效剂量的转换系数; H'/\emptyset 为: 注量到定向剂量当量的转换系数。

考虑 $H(10, 0^\circ)$ 和 $H(3, 0^\circ)$; 当电子能量大于 10 MeV 时, $H(10, 0^\circ)$ 、 $H(3, 0^\circ)$ 和 $H(0.07, 0^\circ)$ 3 个值十分相近, 因此, 可直接用 $H(0.07, 0^\circ)$ 评价 $H(10, 0^\circ)$ 和 $H(3, 0^\circ)$ 。

从图 1 还可以看出, 在电子能量低于 100 keV 时, 估算皮肤剂量也没有必要。当电子能量大于 1 MeV 时, 在电子垂直入射的情况下, $H(0.07, 0^\circ)$ 与皮肤剂量有如下关系:

$$D_s/H(0.07, 0^\circ) = C_{H0} \times C_{S0} \quad (6)$$

表 4 中列出了电子能量大于 1 MeV 时, C_{H0} 、 C_{S0} 及 $C_{H0} \times C_{S0}$ 的值。

表 4 电子能量大于 1 MeV 时, C_{H0} 、 C_{S0} 及 $C_{H0} \times C_{S0}$ 的值

电子能量 (MeV)	C_{H0} (GSv ⁻¹ ·cm ²)	C_{S0} (pGy·cm ²)	$C_{H0} \times C_{S0}$ (Gy·Sv ⁻¹)
1.00	3.205	164	0.526
1.20	3.343	162	0.542
1.50	3.484	158	0.550
2.00	3.584	153	0.548
4.00	3.676	150	0.551
10.0	3.636	165	0.600

注: 表中, C_{H0} : 定向剂量当量到注量的转换系数; C_{S0} : β 射线注量到皮肤剂量的转换系数。

从图 1 中可以看出, $H(0.07, 0^\circ)$ 的值比皮肤剂量的值高, 在 1~9 MeV 范围内, 皮肤剂量的值大约为 $H(0.07, 0^\circ)$ 值的一半, 大于 10 MeV 后, 两个值逐渐接近。

表 4 中列出了在 1~10 MeV 范围, 基于定向剂量当量到注量的转换系数(C_{H0})和 β 射线注量到皮肤剂量的转换系数(C_{S0})得到定向剂量到皮肤剂量的转换系数。从表 4 中的数据可以看出, 当 β 射线能量在 1~10 MeV 范围内时, 定向剂量当量与皮肤剂量的比值变化不大, 从图 1 中也可以看出这种关系。

从以上的讨论可以看出, 当电子能量低于 1 MeV 时, 没有必要估算有效剂量; 当电子能量低于 100 keV 时, 皮肤剂量也不必估算。本标准在附录 A 中列出了

是否需要估算 β 皮肤剂量估算的不同放射性核素。

5 小结

本文对国家职业卫生标准——《 β 射线所致皮肤剂量估算规范》进行了释疑。对制定标准的目的和意义、基础和依据、标准的主要内容进行了说明, 重点解释了 β 射线所致皮肤剂量估算中使用的模型和模体、转换系数等关键技术, 揭示了定向剂量当量与皮肤剂量之间的简单关系, 对准确执行这一标准有一定意义。

参 考 文 献

- [1] International Atomic Energy Agency. Assessment of occupational exposure due to external sources of radiation. Safety Standards Series No. RS-G-1.3. Vienna: IAEA, 1999.
- [2] International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann ICRP, 1996, 26(3-4): 1-137.
- [3] International Commission on Radiological Protection. Nuclear decay data for dosimetric calculations. ICRP Publication 107. Ann ICRP, 2008, 38(3): 1-96.
- [4] International Commission on Radiological Protection. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann ICRP, 2007, 37(2-4): 1-141.
- [5] International Commission on Radiation Units and Measurements. Dosimetry of external beta-rays for radiation protection, ICRU Report 56. Bethesda: ICRU, 1996.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 14056.1-2008 表面污染测定 第 1 部分: β 发射体 ($E_{\beta\text{max}} > 0.15\text{MeV}$) 和 α 发射体. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [7] Chartier JL, Grosswendt B, Gualdrini GF, et al. Reference fluence-to-dose-equivalent conversion coefficients and angular dependence factors for 4-element ICRU tissue, water and PMMA slab phantoms irradiated by broad electron beams. Radiat Prot Dosimetry, 63(1): 7-14.
- [8] Schultz FW, Zoetelief J. Organ and effective doses in the male phantom ADAM exposed in AP direction to broad unidirectional beams of monoenergetic electrons. Health Phys, 1996, 70(4): 498-504.

(收稿日期: 2012-05-20)