

# 腕式剂量计校准的标准辐射场的建立及其应用

欧向明 范瑶华

100088 北京, 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 辐射防护与核应急

中国疾病预防控制中心重点实验室

通信作者: 范瑶华, Email: fyaohua1@sina.com

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.09.015

**【摘要】** 目的 按照国际电工委员会(IEC)技术规范及我国现行核行业标准的相关要求,在国家二级标准剂量学实验室研究与建立用于照射腕式剂量计校准曲线的 X、 $\gamma$  射线标准辐射场,使这类监测数据具有溯源性。方法 通过标准剂量仪测量不同能量 X 射线、 $^{137}\text{Cs}$  及  $^{60}\text{Co}$  参考源等 3 个辐射场的空气比释动能率,结合相关标准规范提供的弱贯穿辐射  $H_p(0.07)$  转换系数,确定了照射腕式剂量计校准曲线的 X、 $\gamma$  标准辐射场参考条件,使用热释光腕式剂量计(TLD)在国际标准化组织(ISO)圆柱模体上照射,完成了 TLD 腕式剂量计线性、能量响应等剂量学指标的验证工作。结果 建立了用于照射腕式剂量计校准曲线的 X、 $\gamma$  射线标准辐射场。结论 建立的 X、 $\gamma$  标准辐射场可以用于照射腕式剂量计标准曲线和能量响应等特性实验的技术服务,并为开展相关的研究工作提供实验条件,进一步提高了监测数据的可比性和可靠性。

**【关键词】** 腕式剂量计; 空气比释动能; 弱贯穿辐射  $H_p(0.07)$ ; 标准辐射场

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目(2014BAI12B04)

## Establishment and application of standard radiation field for wrist dosimeter calibration

Ou Xiangming, Fan Yaohua

Key Laboratory of Radiological Protection and Nuclear Emergency, China CDC, National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088, China

Corresponding author: Fan Yaohua, Email: fyaohua1@sina.com

**【Abstract】 Objective** To establish the standard X/ $\gamma$  radiation fields with respect to the wrist dosimeter calibration curve as required by the international electrotechnical commission (IEC) technical specifications and the relevant national standard. **Methods** Air-kerma rate was determined in the X-ray beams,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  radiation fields by a standard dosimeter. The wrist thermoluminescent dosimetry (TLD) dosimeter was calibrated with personal dose equivalent values  $H_p(0.07)$  on the organization for standardization(ISO) wrist-phantom based on the radiation fields. **Results** The standard X/ $\gamma$  radiation field for the wrist dosimeter irradiation was established. **Conclusions** Established X/ $\gamma$  standard radiation field can be used for such technical services as wrist dosimeter calibration curve and energy response characteristics experiment.

**【Key words】** Wrist dosimeter; Air-kerma;  $H_p(0.07)$ ; Standard radiation field

**Fund program:** National Science and Technology Infrastructure Program(2014BAI12B04)

腕式剂量计(多佩戴在手腕)是一种肢端个人剂量计<sup>[1]</sup>,内置热释光或光激发光(OSL)探测器,可监测 X、 $\gamma$ 、 $\beta$  等多种射线所致的肢端皮肤剂量当量<sup>[2]</sup>,广泛应用于手部操作放射源、在 X 射线下进行介入等手术操作<sup>[3]</sup>,和注射放射性核素等各类从事可能受到非均匀照射的四肢个人剂量监测<sup>[4]</sup>。监测职业外照射个人剂量当量弱贯穿辐射  $H_p$

(0.07),适用于体表 0.07 mm 深处的器官或组织的皮肤剂量当量监测<sup>[5]</sup>,是各个国家的法规中规定需要定期检定的法定剂量计之一<sup>[6]</sup>。近年来,随着介入放射学及核医学等放射诊疗工作广泛深入的开展,按照国家卫生计生委要求各省市上报医用辐射防护监测网数据的相关规定<sup>[7]</sup>,国内各相关个人剂量监测机构发放的腕式剂量计数量不断增加,急需

建立腕式剂量计标准曲线来进行量值溯源和质量控制,为此,中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所——医用放射诊疗设备应用质量控制实验室(SSDL 国家二级标准剂量学实验室),按照国际电工委员会(IEC)发布的相关标准<sup>[8]</sup>,结合我国现行的国家标准(GB)技术规范<sup>[9]</sup>,本研究分别测定了 X、 $\gamma$  标准辐射场校准点空气比释动能等基本参数<sup>[10]</sup>,进口并加工了国际标准化组织(ISO)推荐的圆柱模体,利用国内外公布的  $H_p(0.07)$  的转换因子,完成了热释光腕式剂量计(TLD)线性、能量响应等剂量学指标的验证工作,建立了用于照射腕式剂量计标准曲线的 X、 $\gamma$  标准辐射场<sup>[11]</sup>,从而可提供对腕式剂量计  $H_p(0.07)$  的校准服务。

## 材料与方法

1. X 射线源:X 射线源是由德国 Philips 公司生产的 MG324 两极恒电压高稳定度 X 射线机提供。该机为辐射剂量学专用 X 射线机型,峰值管电压为 60 ~ 250 kV 连续可调,调整步节为 0.2 kV<sup>[12]</sup>。

2.  $\gamma$  射线源: $\gamma$  射线源是由美国 Hopewell 公司生产的 G-10 型  $\gamma$  双源辐照装置提供。该装置为个人剂量计专用刻度机型,分别安装了活度为  $3.7 \times 10^{10}$  Bq(1 Ci) 和  $3.7 \times 10^{11}$  Bq(10 Ci) 的两枚  $^{137}\text{Cs}$  标准  $\gamma$  源。实验室还配备有 1 台  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  标准源照射器。辐射场的长期稳定性是由 LS01 电离室和精密数字电流积分仪构成的测量系统完成的。

3. 标准剂量仪:标准剂量仪由 PTW-UNIDOS 标准剂量仪(德国 PTW 公司)主机,配置体积为  $1\ 000\ \text{cm}^3$  标准空气电离室(Model 32002 LS01,德国 PTW 公司),以完成辐射场空气比释动能的测量<sup>[13]</sup>。标准剂量仪具有优良的能量响应特性,其校准因子可溯源到中国计量科学研究所和国际原子能机构(IAEA)次级标准剂量学实验室<sup>[14]</sup>。

4. 附属检测设备:附属检测设备包括的温度计和气压表,由国家计量院和国家气象局定期进行校准,配置的测量车、轨道和激光定位仪等附属检测装置的技术指标和性能满足辐射剂量学的测量要求。

5. 圆柱模体:圆柱模体是 ISO 推荐照射腕式剂量计时专用,由组织等效材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制成、直径为 73 mm,高为 300 mm 的充水圆柱体。照射腕式剂量计之前,需先将其腕带套在圆柱模体中心位置,使装有 TLD 元件的一面朝向 X

射线管焦点侧(或  $\gamma$  放射源中心),并通过激光定位仪仔细调整,确定腕式剂量计及柱模体的空间位置。根据光阑准直器的发射角、X 射线管焦点(或  $\gamma$  放射源中心)至参考点的距离,确定照射野的尺寸以一次照射 4 只腕式剂量计较为适宜。

6. TLD 腕式剂量计及测量系统:选用北京光润意通辐射监测设备公司生产的腕式剂量计,该剂量计由 1 只 TLD 热释光剂量元件密封盒及 1 副系带组成。每只密封盒内封装了 4 片 GR-200A 型直径为 4.5 mm、厚度为 0.8 mm 的 LiF(Mg, Cu, P) 圆片型 TLD 热释光剂量元件。由北京瑞福特辐射测量仪器有限公司提供的一套 CTLD-250 型热释光读数系统,完成全部 TLD 剂量元件的测量,验证剂量线性和能量响应等剂量学特性。

7. 标准辐射场空气比释动能的测量及  $H_p(0.07)$  标定方法:按照 ISO 4037 窄束、重过滤的 N 系列规范<sup>[15]</sup>,在 60 ~ 250 kV 范围内选定了 7 种常用峰值管电压作为 X 射线参考辐射的检测条件,选用  $^{137}\text{Cs}$  及  $^{60}\text{Co}$  作为  $\gamma$  标准源。

8. 参考条件系列值的确定:使用 PTW-UNIDOS 标准剂量仪,分别测量距离 X 射线管焦点 1.5 m 处、距离  $\gamma$  标准源中心 2.0 m 处校准参考点在 100 s 的空气比释动能率值,计算出  $H_p(0.07)$  的相应参考条件系列值。

9. 建立线性校准曲线:首先选用 80 kV(N80) 的 X 射线,在柱模体上照射 5 组(每组 4 只)腕式剂量计,分别选取  $H_p(0.07)$  的累积剂量值 0.20、0.50、1.00、5.00 和 10.00 mSv,作为线性标准曲线的 5 个约定真值。

10. 照射能量响应特性曲线:针对本次腕式剂量计验证能响特性,在 60 ~ 250 kV 的 X 射线能量范围内,选择了 N60、N80、N100、N120、N150、N200 和 N250 等 7 个能量点,加上  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$  两个  $\gamma$  标准辐射场,共照射 9 组(每组 4 只)腕式剂量计,各组累积照射  $H_p(0.07)$  标准值均为 1.0 mSv,以研究其在 48 keV ~ 1.33 MeV 能量范围内的响应特性<sup>[16]</sup>。

11. 腕式剂量计的测量:将照射完毕的腕式剂量计放置 24 h 之后,取出 TLD 元件,使用 CTLD-250 型热释光读数系统,逐组完成全部 TLD 剂量元件的测量,进行数据处理。

## 结 果

1. 标准辐射场的基本参数:研究建立的腕式剂

量计 X、 $\gamma$  标准辐射场空气比释动能率测量结果,以及个人剂量当量  $H_p(0.07)$  的参考值等基本参数见表 1。其中,空气比释动能率测量结果的不确定度为 5.0% ( $k=2$ )。

表 1 X 和  $\gamma$  射线标准辐射场基本参数

Table 1 The basic parameters of the X and  $\gamma$  standard radiation fields

X、 $\gamma$ 能量点	峰值管电压 (kV)	平均能量 (keV)	空气比释动能率 ( $\mu\text{Gy}/100\text{ s}$ )	转换系数 <sup>a</sup> Sv/Gy	$H_p(0.07)$ ( $\mu\text{Sv}/100\text{ s}$ )
N60	60	48	414.8	1.33	551.7
N80	80	65	406.4	1.39	564.9
N100	100	83	402.4	1.38	555.3
N120	120	100	402.2	1.35	470.6
N150	150	118	406.2	1.32	543.0
N200	200	164	404.5	1.27	513.7
N250	250	208	403.7	1.24	500.6
<sup>137</sup> Cs	—	662	190.7	1.15	219.3
<sup>60</sup> Co	—	1 250	6.1	1.12	6.8

注:<sup>a</sup>转换系数是指在采用圆柱模体校准剂量计时,从空气比释动能(Gy)转换到腕式剂量计测量个人剂量当量  $H_p(0.07, \text{Sv})$  所使用的转换系数。其中 60~250 kV X 射线的 7 个转换系数选自 GB/T 12162.3<sup>[9]</sup>,<sup>137</sup>Cs 及<sup>60</sup>Co 的  $\gamma$  射线转换系数选自 EJ/T 1178<sup>[1]</sup>,表中的“—”为  $\gamma$  射线没有峰值管电压

2. 标准曲线的线性特性:验证腕式剂量计在 80 kV(N80)常用 X 射线照射条件下, $H_p(0.07)$  标准曲线的线性特性,通过计算每组平均值、扣除本底等热释光剂量学等数据处理,完成的剂量线性曲线,得到线性方程  $y = 0.9837x$ ,其校准因子为 0.9837,线性相关系数为 0.9999,见图 1。

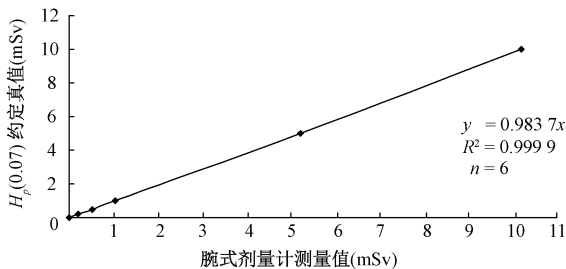


图 1 腕式剂量计线性标准曲线

Figure 1 The standard curve for linearity of wrist dosimeters

3. 能量响应特性验证:根据获得的 60 kV 至 <sup>60</sup>Co 的光子能量范围内(48 keV 至 1.33 MeV),9 个能量点照射下、腕式剂量计的测读结果,通过数据处理和制表,各能量点  $H_p(0.07)$  的测量值(mSv),均归一到<sup>137</sup>Cs 的测量值(mSv),得到的能量响应范围在  $\pm 30\%$ 。完成的腕式剂量计验证能量响应特性验证,其结果见表 2。

表 2 腕式剂量计 X 和  $\gamma$  射线能量响应特性

Table 2 The energy response of wrist dosimeters for X and  $\gamma$  rays

X、 $\gamma$ 能量点	平均能量 (keV)	响应值	归一( <sup>137</sup> Cs)后响应值
N60	47	1.19	1.20
N80	65	1.01	1.02
N100	84	0.82	0.83
N120	101	0.79	0.80
N150	111	0.76	0.77
N200	165	0.80	0.81
N250	206	0.81	0.82
<sup>137</sup> Cs	662	0.99	1.00
<sup>60</sup> Co	1 250	1.05	1.06

## 讨 论

本实验室新建的用于校准  $H_p(0.07)$  个人剂量计的标准辐射场,是在 X、 $\gamma$  射线标准辐射场中,专门为了校准腕式剂量计使用的。与之前建立的校准指环剂量计(使用棒模体)的标准辐射场相比,二者虽然都是用于校准  $H_p(0.07)$  个人剂量计的标准辐射场,但用于照射的剂量计不同、使用的模体不同,因此,对于不同 X、 $\gamma$  能量点而言,从空气比释动能(Gy),转换到腕式剂量计测量个人剂量当量(Sv),所使用的  $H_p(0.07)$  转换系数均有差异。另一方面,目前临床所采用的一部分 X 射线能量是属于医学影像辐射线质,即国际原子能机构(IAEA)推荐的辐射诊断(RQR)线质范围<sup>[17]</sup>,对于 RQR 线质应采用什么转换系数有待进一步深入研究,不断满足医学影像、放射诊疗领域质量控制和溯源性的需求。

通过 TLD 线性校准曲线及能量响应特性等辐射剂量学指标的验证,新建的  $H_p(0.07)$  标准辐射场能满足 ISO 相关剂量计实验的技术指标的要求,这也与国外的文献报道相一致<sup>[18-19]</sup>。各项检测结果表明,本实验室研究和建立的腕式剂量计 X、 $\gamma$  标准辐射场,也符合我国现行国家标准的要求和技术规范,可以用于国际比对、照射常规剂量计标准曲线的技术服务、并为开展相关的研究工作提供实验条件。

利益冲突 本人与本人家属、其他研究者,未因进行该研究而接受任何不正当的职务或财务利益,与企业间无经济关系,不存在引起利益冲突的其他关系,在此对研究的独立性和科学性予以保证

**作者贡献声明** 欧向明负责论文选题与研究、实验数据收集、整理,文章撰写;范瑶华负责验证计划的设计,复核实验数据

### 参 考 文 献

- [1] 国防科学技术工业委员会. EJ/T 1178-2005 肢端和眼睛热释光个人剂量计[S]. 北京:国防科学技术工业委员会,2005. National Defense Science and Technology Industry Committee. EJ/T 1178-2005 Individual thermoluminescence dosimeters for extremities and eyes[S]. Beijing: National Defense Science and Technology Industry Committee, 2005.
- [2] 联合国原子辐射效应科学委员会. 电离辐射源与效应[M]. 太原:山西科学技术出版社,2002. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Ionizing radiation sources and effects[M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 2002.
- [3] 彭建亮, 娄云, 冯泽臣, 等. 3 种介入术中工作人员的辐射剂量水平分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2011, 31(4): 395-397. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2011.04.005. Peng JL, Lou Y, Feng ZC, et al. Evaluation of radiation dose to working operator in three types of interventional fluoroscopic procedures[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2011, 31(4): 395-397. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2011.04.005.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. GB 18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京:中国标准出版社,2002. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18871-2002 Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [5] 中华人民共和国卫生部. GBZ 207-2008 外照射个人剂量系统性能检验规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008. Ministry of Health, the People's Republic of China. GBZ 207-2008 Testing criteria of personnel performance[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [6] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国计量法[M]. 北京:法律出版社,2009. Standing Committee of the National People's Congress. Law of the People's Republic of China on metrology[M]. Beijing: Legal Press,2009.
- [7] 中华人民共和国卫生部令第 46 号. 放射诊疗管理规定[M]. 北京:人民卫生出版社,2006. Decree of No.46 of the Ministry of Health of the People's Republic of China. The provisions on the administration of radiation treatment[M]. Beijing: People's Medical Publishing House,2006.
- [8] International Electrotechnical Commission. IEC 62387-2012. Radiation protection instrumentation-passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation[S]. Geneva: IEC, 2012.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12162.3-2004 场所剂量仪和个人剂量计的校准及其能量响应和角响应的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2004. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 12162.3-2004 Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function[S]. Beijing: Standards Press of China,2004.
- [10] International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU report No 51. Quantities and units in radiation protection dosimetry[R]. Bethesda: ICRU, 1993.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12162.2-2004 用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的 X 和  $\gamma$  参考辐射[S]. 北京:中国标准出版社,2004. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 12162.2-2004 Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function[S]. Beijing: Standards Press of China,2004.
- [12] Seelentag WW, Penzer W. Catalogue of spectra used for calibration of dosimeter[R]. Munich: GSF-Bericht S560, 1979; 35-55.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 19629-2005 医用电气设备 X 射线诊断影像中使用的电离室和(或)半导体探测器剂量计[S]. 北京:中国标准出版社,2005. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 19629-2005 Medical electrical equipment-dosimeters with ionization chambers and/or semi-conductors as used in X-ray diagnostic imaging[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [14] International Electrotechnical Commission. IEC 61674-1997. Medical electrical equipment-dosimeters with ionization chambers and/or semi-conductors as used in X-ray diagnostic imaging[S]. Geneva: IEC, 1997.
- [15] International Organization for Standardization. ISO 4037. X and  $\gamma$  reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy-part 3: calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function[S]. Geneva: ISO, 2004.
- [16] Oberhofer M. 应用热释光剂量学. 张彤,译[M]. 北京:中国计量出版社,1988. Oberhofer M. Application of thermoluminescence dosimetry. Zhang T, trans[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1988.
- [17] International Atomic Energy Agency. Dosimetry in diagnostic radiology an international code of practice[R]. Vienna: IAEA, 2005.
- [18] International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU report No 74. Patient dosimetry for X rays used in medical imaging[R]. Bethesda: ICRU, 2005.
- [19] Efstathopoulos EP, Pantos I, Andreou M, et al. Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology procedures[J]. Br J Radiol, 2011, 84(997):70-77. DOI: 10.1259/bjr/83222759.

(收稿日期:2016-03-23)