

两种眼晶体剂量计在同一辐射场刻度 $H_p(3)$ 结果讨论

李文炎, 张贵英, 刘澜涛, 牛东升, 郭泽钦, 王志超, 拓华, 武鹤雁, 夏亭亭, 楚妮妮, 赖继川, 陈娇娇

北京市化工职业病防治院放射部, 北京 100093

摘要: **目的** 通过使用国内外两种剂量计(简称 A、B)在同一种辐射场(RQR 标准 X 射线辐射场)刻度 $H_p(3)$, 比较刻度结果, 探究刻度 $H_p(3)$ 的响应差异, 为 $H_p(3)$ 的刻度提供基础依据。**方法** 选择柱模, 使用 A、B 两种剂量计, 在中国疾控中心辐射安全所二级标准剂量学实验室 X 射线 RQR 辐射场进行 $H_p(3)$ 的刻度, 选择射线包括 RQR4(管电压为 60 kV)、RQR7(管电压为 90 kV)、RQR9(管电压为 120 kV), 刻度内容包括角度响应、能量响应和线性响应。**结果** 在角度响应方面, A 型剂量计对 RQR 标准 X 射线辐射场响应偏高, B 型剂量计对 RQR 标准 X 射线辐射场响应偏低。在能量响应方面, A 型剂量计响应偏高, B 型剂量计响应偏低。在线性响应方面, 2 种剂量计拟合程度均较好。**结论** A、B 两种剂量计可以在 RQR 标准 X 射线辐射场刻度 $H_p(3)$, 在实际监测时, 应注意角度和能量对 TLD 响应值的影响。

关键词: 标准 RQR 辐射场; 眼晶体; $H_p(3)$; 热释光剂量计 (TLD)

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2024)03-0318-05

Discussion of $H_p(3)$ calibration with two thermoluminescent dosimeters in the same standard X-ray RQR radiation field

LI Wenyan, ZHANG Guiying, LIU Lantao, NIU Dongsheng, GUO Zeqin, WANG Zhichao, TUO Hua,
WU Heyan, XIA Tingting, CHU Nini, LAI Jichuan, CHEN Jiaojiao

Radiochemistry Laboratory of Radiation Technology Department, Beijing Prevention and Treatment Hospital of
Occupational Disease for Chemical Industry, Beijing 100093 China

Abstract: **Objective** To compare $H_p(3)$ calibration with a homemade (A) thermoluminescent dosimeter (TLD) and an imported (B) TLD in a standard X-ray RQR radiation field, to explore the different responses of A and B, and to provide foundation for the calibration of $H_p(3)$. **Methods** A column mode was selected. $H_p(3)$ calibration was performed using A and B in a standard X-ray RQR radiation field in the Secondary Standard Dosimetry Laboratory, National Institute for Radiological Protection, China Center for Disease Control and Prevention. Angle response, energy response, and linear response were calibrated with RQR4 (60 kV), RQR7 (90 kV), and RQR9 (120 kV), respectively. **Results** In terms of angle response, the calibration results of A were relatively high, while the calibration results of B were relatively low. In terms of energy response, the calibration results showed a similar pattern to angle response. In terms of linear response, the calibration results of both A and B were satisfactory. **Conclusion** Both A and B can be used for normal calibration of $H_p(3)$ in a standard X-ray RQR radiation field. However, in actual monitoring, attention should be paid to the energy and angle response values of TLDs.

Keywords: Standard X-ray RQR field; Eye lens; Personal dose equivalent $H_p(3)$; Thermoluminescent dosimeter

Corresponding author: ZHANG Guiying, Email: 18600668652@163.com

1993 年, 国际辐射单位与测量委员会(ICRU)在 51 号报告中指出 $H_p(3)$ 是最适合评估眼晶体受照剂量的实用量^[1]。然而在实际的监测过程中, 由于 $H_p(3)$ 的刻度问题一直没有解决, 因此在过去大部分用的是 $H_p(0.07)$ 或 $H_p(10)$ 来评估眼晶体受照剂量。

所以, 使用适合的剂量计并准确的进行 $H_p(3)$ 的刻度显得尤为重要。

欧盟辐射防护最优化项目(ORAMED)在 2008 年设计了一种可以监测 $H_p(3)$ 的眼晶体剂量计, 设计了一种新的圆柱状(直径 20 cm、高 20 cm)模拟人体

头颅的衰减模体^[2]。国外有研究学者利用这种圆柱状模体得到了窄谱标准辐射质对应的空气比释动能(air kerma, K_a)与 $H_p(3)$ 的换算系数^[2-3]。此后,有国内外研究学者利用新型的眼晶体剂量计、柱模模体以及 K_a 与 $H_p(3)$ 的换算系数对职业人员眼晶体受照剂量进行了研究^[4-10]。有报道国内研究学者用国外眼晶体剂量计在 N 系列窄谱辐射场进行刻度^[11],而在 RQR 标准 X 射线辐射场刻度 $H_p(3)$ 的报道较少。但实际上, RQR 能谱比 N 系列窄谱、ISO 系列更宽,因此更接近实际的工作场所能谱。

因此本研究通过使用国内外 2 种剂量计在国内同一种辐射场(RQR 标准 X 射线辐射场)刻度 $H_p(3)$,对 2 种剂量计刻度结果进行比较,探究使用 2 种剂量计在同一种辐射场(RQR 标准 X 射线辐射场)刻度 $H_p(3)$ 的响应差异,为 $H_p(3)$ 的刻度提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 辐射场 在中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所的医用放射诊疗设备应用质量控制实验室,即国家二级标准剂量学实验室(SSDL)进行照射,选择的辐射场为 RQR 标准 X 射线辐射场。

X 射线源:双极恒电压高稳定度型 X 射线机,型

号为 MG324,生产厂家为德国汉堡飞利浦公司,为辐射剂量学专用的 X 射线机型,管电压值在 60~250 kV 可连续调节^[12]。

1.2 剂量计 A、B 两种剂量计均使用热释光剂量计(TLD),剂量计均由聚酰胺(PA)材料制作,大小、尺寸基本一致。TLD 探测器为 LiF(Mg、Cu、P),直径 4.5 mm,厚度 0.8 mm,分散性 < 3%,剂量响应范围:10 μ Sv~10 Sv。2 种剂量计外观见图 1。

1.3 照射方式 在眼晶体剂量盒中放置热释光探测器,在国内 RQR 标准 X 射线辐射场分别对 A、B 两组 TLD(每组包含有 5 个 TLD,每个 TLD 里面包含有 1 片热释光探测器)进行照射。将 TLD 固定在模体表面进行照射,参考点与 X 射线球管焦点距离为 1 m。

1.4 测读装置 使用 RE2000S 热释光测量装置进行测读,测读装置的生产厂家为美国 MIRION TECHNOLOGIES。测量时环境条件为:温度 21 $^{\circ}$ C,湿度 32%。

1.5 比释动能率测量 PTW-UNIDOS 国内标准剂量仪,标准空气电离室(Model 32002 LS01,体积为 1000 cm^3),测量参考点的空气比释动能率等基本参数^[13],校准因子可溯源到中国计量科学研究院国家标准实验室和国际原子能机构(IAEA)次级标准剂量学实验室。



图 1 国外剂量计(左)、国内剂量计(右)

Figure 1 Imported thermoluminescent dosimeter (left) and homemade thermoluminescent dosimeter (right)

1.6 $H_p(3)$ 标定

1.6.1 刻度方法 本研究采用 ORAMED 项目^[4]推荐的刻度方法,选择直径 20 cm、高 20 cm 的圆柱状模体,在国内 RQR 标准 X 射线辐射场对 A、B 两种 TLD 刻度 $H_p(3)$,通过对距离 X 射线管焦点 1 m 处校准参考点的空气比释动能率值进行测量,来计算 $H_p(3)$ 在相应参考条件下的系列值。

1.6.2 换算系数 参照国际电工委员会(IEC)61267 出版物中的 K_a 与 $H_p(3)$ 的换算系数^[14]对 $H_p(3)$ 进行刻度,换算系数 $h_{p,k}(3)=H_p(3)/K_a$ 。

1.6.3 照射条件选择 能量响应:选择的射线为 RQR4(X 射线管电压为 60 kV)、RQR7(X 射线管电

压为 90 kV)、RQR9(X 射线管电压为 120 kV),入射的角度为 0° ,照射的剂量为 50.00 mSv。

角度响应:选择的射线为 RQR7(X 射线管电压为 90 kV),照射的角度分别为 0° 、 20° 、 40° 、 60° 、 75° ,照射的剂量为 50.00 mSv。

线性响应:选择的射线为 RQR7(X 射线管电压为 90 kV),照射的剂量分别为 5.00、15.00、25.00、50.00、100.00 mSv。

1.7 不确定度的评定 根据国家计量技术规范(JJF 1059.1—2012)中“测量不确定度评定与表示”^[15],对测量结果的不确定度进行评定。本次研究主要对在 RQR 标准 X 射线辐射场照射后的 A、B 两种 TLD 响

应值(响应值=测量装置测读值×校准因子, 响应值单位: mSv)的不确定度进行评定。

(1)不确定度的 A 类评定: 测量结果的重复性 ($n=5$), 2.0%;

(2)不确定度的 B 类评定: 标准剂量仪器量值传递(主要指 TLD 测读装置), 5.3%; K_a 与 $H_p(3)$ 的换算系数, 0.3%; X 射线辐射场辐射质差异, 1.0%; 辐

射场的不均匀性, 1.0%; 测量环境因素, 0.5%; 其他, 1.0%。

2 结果

2.1 能量响应刻度结果 使用 A、B 两种 TLD 在 RQR 标准 X 射线辐射场刻度 $H_p(3)$ 的能量响应结果见表 1。

表 1 能量响应刻度结果

Table 1 The energy responses of thermoluminescent dosimeters in calibration

射线类型	照射剂量/mSv	入射角度	A型TLD响应值/mSv	与照射值差异(%)	B型TLD响应值/mSv	与照射值差异(%)
RQR4	50.00	0°	58.84	17.7	48.87	-2.3
RQR7	50.00	0°	57.10	14.2	46.30	-7.4
RQR9	50.00	0°	52.48	4.8	44.18	-11.6

从表 1 可以看出, A 型 TLD 对 RQR 标准 X 射线辐射场响应均偏高, RQR4(X 射线管电压为 60 kV)、RQR7(X 射线管电压为 90 kV)的照射值与响应值差异均超过 10% 但小于 30%。B 型 TLD 对 RQR 标准 X 射线辐射场响应均偏低, RQR9(X 射线管电压为 120 kV)的照射值与响应值差异超过 10% 但小于 30%。归一到 60 keV 响应结果见图 2。

2.2 角度响应刻度结果。 使用 A、B 两种 TLD 在 RQR 标准 X 射线辐射场刻度 $H_p(3)$ 的角度响应结果见表 2。

从表 2 可以看出, A 型 TLD 对 RQR 标准 X 射线辐射场响应偏高, 照射值与响应值差异随着照射角度的增大而增大, 在 60°和 75°时差异超过了 10% 但小于 30%。B 型 TLD 对 RQR 标准 X 射线辐射场在 0°、20°、40°、60°时响应值偏低, 在 75°时响应值偏高, 在 40°、60°、75°时响应较好, 照射值与响应值差异在 10% 以内。

2.3 线性响应刻度结果。 使用 A、B 两种 TLD 在 RQR 标准 X 射线辐射场刻度 $H_p(3)$ 的线性响应结果见表 3。

图 3 为 A 型 TLD 在 RQR 标准 X 射线辐射场进行 $H_p(3)$ 刻度后拟合出的标准曲线。

从图 3、图 4 可以看出 A、B 两种 TLD 在 RQR 标准 X 射线辐射场进行 $H_p(3)$ 刻度后线性响应的拟合度均较好, R^2 (线性相关系数, 用于反应拟合度)分别为 0.996 和 0.9998。

2.4 不确定度评定 不确定度评定的计算公式:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad 1)$$

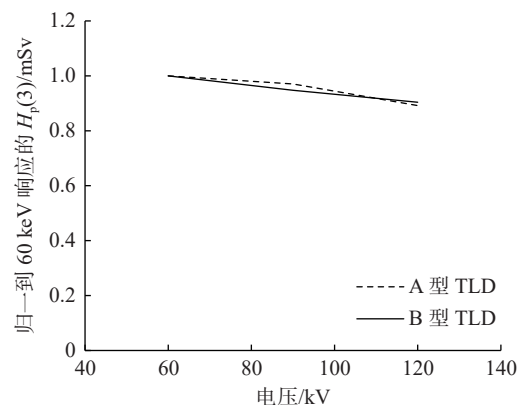


图 2 能量响应趋势图

Figure 2 The trend of energy response

表 2 角度响应刻度结果

Table 2 The angle responses of thermoluminescent dosimeters in calibration

照射角度	照射剂量/mSv	A型TLD响应值/mSv	与照射值差异(%)	B型TLD响应值/mSv	与照射值差异(%)
0°	50.00	52.41	4.8	44.18	-11.6
20°	50.00	52.99	6.0	43.49	-13.0
40°	50.00	54.66	9.3	45.25	-9.5
60°	50.00	56.99	14.0	47.80	-4.4
75°	50.00	63.02	26.0	53.00	6.0

表 3 线性响应刻度结果

Table 3 The linear responses of thermoluminescent dosimeters in calibration

射线类型	照射剂量/mSv	入射角度	A型TLD响应值/mSv	B型TLD响应值/mSv
RQR7	1.00	0°	1.03	0.84
RQR7	5.00	0°	5.22	4.21
RQR7	15.00	0°	15.26	12.56
RQR7	25.00	0°	25.64	21.76
RQR7	50.00	0°	57.10	46.30

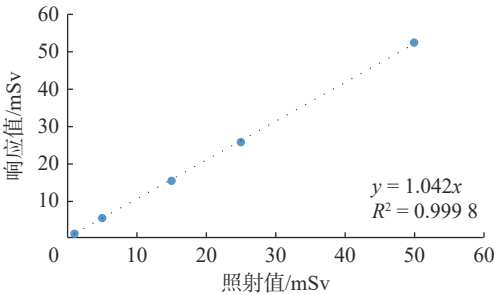


图 3 A 型 TLD 在 RQR 标准 X 射线辐射场刻度拟合出的标准曲线

Figure 3 The fitted calibration curve of thermoluminescent dosimeter A in a standard X-ray RQR radiation field

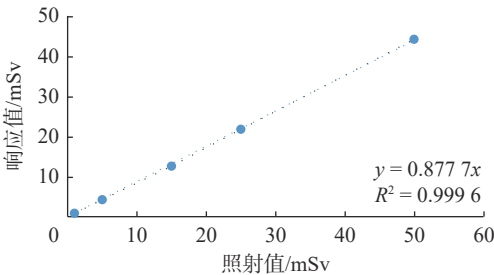


图 4 B 型 TLD 在 RQR 标准 X 射线辐射场刻度拟合出的标准曲线

Figure 4 The fitted calibration curve of thermoluminescent dosimeter B in a standard X-ray RQR radiation field

其中, u_c 为合成后的不确定度, u_A 为不确定度的 A 类评定, u_B 为不确定度的 B 类评定。

对本研究测量结果的 A 类评定和 B 类评定, 合成后的不确定度为: 6.9% ($k=2$)。

3 讨 论

在介入放射学领域, 涉及的 X 射线性质属于医学影像学范畴的辐射线质, 也就是 ICRU 推荐的 RQR 辐射线质。本次研究是在国内 RQR 标准 X 射线辐射场对 A、B 两种 TLD 进行照射, 因此响应值与照射值的差异主要来源于 TLD。

本次研究通过在 RQR 标准 X 射线辐射场对 A、B 两种 TLD 进行刻度, 比较刻度的差异性, 得出以下

结论:

在能量响应方面, A、B 两种 TLD 的响应值随能量的增大而逐渐减小, 表明 RQR 辐射场的能量会对 TLD 的响应值产生影响; 在角度响应方面, A 型 TLD 的响应值随照射角度的增大而增大, B 型 TLD 除 20° 外, 响应值随照射角度的增大而增大, 表明 RQR 辐射场的照射角度会对 TLD 响应值产生影响; 在线性响应方面, A、B 两种 TLD 在 RQR 辐射场拟合度均较好, 表明 A、B 两种 TLD 在 RQR 辐射场刻度的线性响应均较好。

在角度响应、能量响应以及线性响应所有测得值中, A 型 TLD 响应值均高于 B 型 TLD 的响应值, 说明本次研究中 A 型 TLD 比 B 型 TLD 的响应值高。能量响应的测得值中, A 型 TLD 的最大偏差为 17.7%, B 型 TLD 的最大偏差为 -11.6%; 角度响应的测得值中, A 型 TLD 的最大偏差为 26.0%, B 型 TLD 的最大偏差为 -13.0%, 说明整体上 B 型 TLD 的响应值要优于 A 型 TLD。

本研究的测量结果表明, 通过使用 A、B 两种 TLD、使用柱模在 RQR 标准 X 射线辐射场进行 $H_p(3)$ 的刻度, 2 种 TLD 刻度的响应值偏差均小于 30%, 符合我国现行的标准规范要求(相对响应偏差小于 30%)^[16]。因此 2 种 TLD 可以用于眼晶体剂量监测。但在实际监测时, 应注意能量和角度对 TLD 响应值的影响。

志谢 感谢北京市化工职业病防治院(北京市职业病防治研究院)为本研究提供研究经费

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 李文炎、张贵英负责此研究的设计、刻度并撰写文章; 郭泽钦、王志超、拓华、武鹤雁、夏亭亭、楚妮妮、赖继川、陈娇娇参与测读及数据分析工作; 刘澜涛、牛东升协助研究

参考文献

- [1] International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report No 51. Quantities and units in radiation protection dosimetry[R]. Bethesda: ICRU, 1993.
- [2] Gualdrini G, Bordy JM, Daures J, et al. Air kerma to $H_p(3)$ conversion coefficients for photons from 10 keV to 10 MeV, calculated in a cylindrical phantom[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2013, 154(4): 517-521. DOI: [10.1093/rpd/ncs269](#).
- [3] Behrens R. Air kerma to $H_p(3)$ conversion coefficients for a new cylinder phantom for photon reference radiation qualities[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2012, 151(3): 450-455. DOI: [10.1093/rpd/ncs032](#).
- [4] O'Connor U, Walsh C, Gallagher A, et al. Occupational radiation dose to eyes from interventional radiology procedures in light of the new eye lens dose limit from the International Commission on Radiological Protection[J]. *Br J Radiol*, 2015, 88(1049): 20140627. DOI: [10.1259/bjr.20140627](#).
- [5] Domienik J, Rusicka D, Szubert W. A study on the dose distributions near the eye lens and the legs. Part 2-Interventional radiology[J]. *Radiat Meas*, 2013, 51-52: 62-66. DOI: [10.1016/j.radmeas.2013.01.006](#).
- [6] Struelens L, Schoonjans W, Schils F, et al. Extremity and eye lens dosimetry for medical staff performing vertebroplasty and kyphoplasty procedures[J]. *J Radiol Prot*, 2013, 33(3): 635-645. DOI: [10.1088/0952-4746/33/3/635](#).
- [7] Pirchio R, Sánchez H, Domazet W. Dosimetric studies of the eye lens using a new dosimeter-surveys in interventional radiology departments[J]. *Radiat Meas*, 2014, 63: 12-17. DOI: [10.1016/j.radmeas.2014.02.005](#).
- [8] Urboniene A, Sadzeviciene E, Ziliukas J. Assessment of eye lens doses for workers during interventional radiology procedures[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2015, 165(1/4): 299-303. DOI: [10.1093/rpd/ncv173](#).
- [9] 李文炎, 范瑶华, 黄卓, 等. 介入手术中职业人员眼晶体受照剂量测量方法及剂量水平研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2016, 36(4): 303-307. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.04.015](#).
- Li WY, Fan YH, Huang Z, et al. The measurements of eye lens dose for occupational staff in interventional procedures[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2016, 36(4): 303-307. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.04.015](#).
- [10] 李文炎, 张贵英, 王志超, 等. 不同标准 X 射线 RQR 辐射场刻度眼晶体当量剂量 $H_p(3)$ 比较研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2020, 40(1): 42-46. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2020.01.007](#).
- Li WY, Zhang GY, Wang ZC, et al. Research of TLD calibrated in different standard X-ray RQR radiation field in terms of eye lens dose $H_p(3)$ [J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2020, 40(1): 42-46. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2020.01.007](#).
- [11] 丁艳秋, 郭文, 胡爱英, 等. 眼晶体、指环剂量计的部分剂量学性能实验测试研究[J]. *中国辐射卫生*, 2021, 30(1): 1-4,9. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.001](#).
- Ding YQ, Guo W, Hu AY, et al. Experimental research on partial dosimetric performance for eye lens dosimeter and ring dosimeter[J]. *Chin J Radiol Health*, 2021, 30(1): 1-4,9. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.001](#).
- [12] Ahuja SD. *A Catalogue of Spectra for the Calibration of Dosimeters*, by W. Seelentag, W. Panzer, G. Drexler, L. Platz, and F. Santner[J]. *Med Phys*, 1982, 9(1): 134-135. DOI: [10.1118/1.595145](#).
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 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, Standardization Administration 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] IEC 61267: 2005. Medical diagnostic X-ray equipment-Radiation conditions for use in the determination of characteristics[S]. Geneva: IEC, 2005.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJF 1059.1—2012 Evaluation and expression of uncertainty in measurement[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GBZ/T 10264—2014 个人和环境监测用热释光剂量测量系统[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GBZ/T 10264 —2014 Thermoluminescence dosimetry systems for personal and environmental monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

(收稿日期: 2023-12-19)