

GD-300 系列辐射光致发光玻璃剂量计的 辐射剂量学特性

卓维海, 刘伟琪, 黄刚, 郑钧正, 刘海宽

(复旦大学 放射医学研究所, 上海 200032)

摘要:为掌握新引进的辐射光致发光玻璃剂量计的辐射剂量学特性,通过用次级标准剂量学实验室的 X 射线照射装置、 ^{60}Co γ 放射源(1 250 keV)及经检定的 ^{137}Cs γ 放射源(662 keV)照射,考察了 GD-300 系列辐射光致发光玻璃剂量计的剂量线性、均匀性、重复性、衰退特性和能量响应等剂量学性能。实验研究表明, GD-300 系列辐射光致发光玻璃剂量计的辐射剂量学性能良好,适合作为放射工作人员外照射剂量、放射诊疗受检者与患者剂量的测量,也适用于环境辐射的长期累积测量。

关键词:辐射光致发光; 剂量线性; 均匀性; 重复性; 衰退

中图分类号: TL818.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2008)12-1120-05

Dosimetric Properties of GD-300 Series of Radiophotoluminescent Glass Detector

ZHUO Wei-hai, LIU Wei-qi, HUANG Gang, ZHENG Jun-zheng, LIU Hai-kuan

(*Institute of Radiation Medicine, Fudan University, Shanghai 200032, China*)

Abstract: In order to grasp the dosimetric properties of the newly imported radiophotoluminescent glass dosimeter (RPLGD), experiments for studying the dose linearity, uniformity and reproducibility of signal, fading effect and energy dependence of the RPLGD were performed by using the X-ray emitting device and ^{60}Co as well as ^{137}Cs sources in a secondly standard dosimetry laboratory. The general dosimetric properties of the RPLGD are fairly good. It indicates that the RPLGD is suitable for monitoring the external exposure of radiation workers, evaluating the patient dose from medical exposure, and monitoring the long-term integrated environmental radiation levels.

Key words: radiophotoluminescence; dose linearity; uniformity; reproducibility; fading effect

自 20 世纪 60 年代以来,以热释光剂量计 (TLD)^[1-2]和辐射光致发光玻璃剂量计(RPL-

GD)^[3-4]为代表的固体发光剂量学方法迅速发展,并在国内、外均得到广泛应用。早期玻璃剂

量计因其内在荧光大,不易测量小于 1 mGy 的辐射剂量,且在测读前需对玻璃剂量计进行清洗而难以实现自动测读等原因^[5],未得到普遍推广应用。20 世纪 90 年代研发的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 光致发光剂量计(OSL)得以发展^[6],在第 15 次国际固体剂量学会议上,有关 OSL 的论文颇多^[7]。近年来,随着连续脉冲激光技术在辐射光致发光测量中的成功应用,实现了对玻璃剂量计内在荧光和玻璃表面污染物荧光的分离,显著降低了其测量下限。另外,由于玻璃剂量计具有可重复测读的特性,且其剂量学特性基本不受环境温度影响,因而重新受到青睐,为辐射剂量探测展示了广阔的应用前景^[8-9]。

为准确评价各种放射诊疗所致受检者与患者的医疗照射剂量水平,必须进行人体模拟实验^[10-11],其中选择使用合适的辐射剂量测量手段颇为重要。本工作拟研究新引进的 GD-300 系列辐射光致发光玻璃剂量计的主要剂量学特性。

1 原理与仪器设备

1.1 辐射光致发光玻璃剂量计原理

掺银(Ag^+)磷酸盐玻璃在受到电离辐射照射后,可形成两个稳定的发光陷阱中心(图 1)。电子陷阱(Ag^0)和空穴陷阱(Ag^{2+})的密度在相当宽的范围内与电离辐射的剂量成正比,仅在吸收带受到选定光谱的激发后,才可测到其发出的荧光,即辐射光致发光。通过对荧光的收集测量,利用所记录荧光强度与受照辐射剂量具有良好线性关系,经剂量学刻度标定后,达到计量电离辐射剂量的目的。

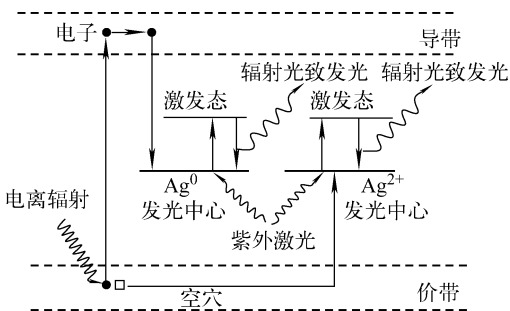


图 1 玻璃剂量计的辐射光致发光原理示意图

Fig. 1 Scheme of principle for radiophotoluminescence in glass dosimeter

1.2 辐射光致发光玻璃剂量计及测读仪器

本研究所用的辐射光致发光剂量测量系统主要由日本 Chiyoda Technol Co. 提供的 GD-300 系列玻璃剂量计及其配套测读装置 FGD-1000 型测读仪(日本 Asahi Techno Glass Corporation 研发)组成。读出前的预热装置为日本 Yamato Scientific Co. Ltd. 生产的 DK-300T 型恒温箱,退火装置使用日本 Hayashi Denko Co. Ltd. 生产的 NEW-1C 型退火炉。GD-300 系列玻璃剂量计为棒状银离子激活磷酸盐玻璃探测器,其密度和等效原子序数分别为 2.61 g/cm^3 和 12.039 ^[9]。本研究采用 GD-301 和 GD-351 型棒状玻璃探测器,其外观尺寸均为 $\phi 1.5 \text{ mm} \times 8.5 \text{ mm}$;GD-351 型探测器带有能量补偿外套(1.5 mm Sn),可用于医学 X 射线诊断能量范围的检测。配套的 FGD-1000 型剂量测读仪可实现自动测量。测读仪器内置可发出波长为 320 nm 紫外光的氮气激光器。当受过电离辐射照射的玻璃剂量计受到此波长的紫外光激发后,其发光中心将释放出波长为 606 nm 的橙色光。用脉冲激光器发射的紫外线连续激发玻璃剂量计的发光中心,可实现短时间内的多次发光和测量。通过对两个不同时间段($t_1 \rightarrow t_2$; $t_3 \rightarrow t_4$)的发光测量,可先甄别去除玻璃表面污染物所发出的荧光(衰退时间约 $1 \mu\text{s}$)和少量内在荧光,测出 $t_1 \rightarrow t_2$ 时间段内辐射光致发光和内在荧光的总量和 $t_3 \rightarrow t_4$ 时间段内的内在荧光量,最终计算出净辐射光致发光的量。本剂量测量系统的使用条件基本均按厂家要求,但读出前的预热条件根据最新研究结果^[12]改选为 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 40 min。

1.3 实验用照射源

实验用照射源采用上海市计量测试技术研究院的国际原子能机构(IAEA)和世界卫生组织(WHO)所属次级标准剂量学实验室(SSDL)的 X 射线照射装置和 ^{60}Co γ 放射源(1 250 keV),及经上述实验室刻度的 ^{137}Cs γ 放射源(662 keV)。

2 实验方法

2.1 剂量线性

剂量线性是衡量剂量计最重要的性能指标,是指经电离辐射照射后,剂量计测读受激而

释放的光信号与所接受照射的辐射剂量呈正比的范围。本研究采用 X 射线分别以 0.2、2 和 20 mGy 的剂量照射 3 组玻璃剂量计 (GD-351), 用 ^{137}Cs γ 放射源分别以 0.08、0.2、0.5、1 和 2 Gy 的剂量照射 5 组 GD-351。每组剂量计 5 个, 求其平均值, 而后统计分析剂量在 0.2 mGy~2 Gy 范围内, 辐射光致发光信号与所接受照射的辐射剂量之间的关系。

2.2 均匀性

批内均匀性是检验探测器质量的一个重要指标。本工作用 ^{137}Cs γ 放射源分别照射 3 组玻璃剂量计, 每组剂量计 20 个, 剂量点的选择为 0.2、20 及 200 mGy, 求出每组剂量计测量读数的变异系数。

2.3 重复性

辐射光致发光玻璃剂量计不同于热释光剂量计, 具有独特的可多次重复测读性能, 即电离辐射照射形成的发光中心经测读后不会消失, 可多次激发重新测读。将同一玻璃剂量计经 ^{137}Cs γ 放射源照射 1 次, 连续重复测读 10 次, 统计 10 次读出值的变异系数反映其重复性。实验分 3 组玻璃剂量计, 分别照射 0.2、20 及 200 mGy 的剂量。

2.4 自身衰退

自身衰退是指在固体剂量计内由辐射所引起的发光中心, 其内部的电子和空穴受到环境温度及其它因素的影响而先行逃离发光中心, 导致发光信号的减弱现象。通常认为, 温度是造成这种损失的主要原因之一。本研究用 ^{137}Cs γ 放射源同时照射 1 组 (24 个) 玻璃剂量计 200 mGy, 均经热处理后置于室温 (22~31 $^{\circ}\text{C}$) 的铅室中, 以减少环境本底辐射波动对剂量计的影响。而后, 分别在照射后 6 h、1 d、2 d、5 d、10 d、20 d、30 d 和 60 d 各取出 3 个玻璃剂量计进行测读, 统计发光剂量计的各次读数结果, 探讨其自身衰退特性。

2.5 能量响应

剂量计的能量响应特性与照射剂量点的射线能量也有关。由于剂量计材质不同, 对不同能量射线的响应程度不同。通过剂量计的能量响应曲线, 可寻找过滤补偿办法以扩展应用范围。本工作利用不同能量的光子同时照射有能量补偿和无能量补偿的玻璃剂量计各 10 个。

实验选择的照射光子能量分别为 30、65、90、121 keV 的 X 射线和 ^{137}Cs 的 662 keV 及 ^{60}Co 的 1 250 keV γ 射线, 照射剂量均为 20 mGy。本工作以 ^{137}Cs γ 源所照射的读出值作为归一化标准来探讨玻璃剂量计的能量响应特性。

3 结果与讨论

3.1 剂量线性

剂量计的线性在很大程度上决定了测量的准确性。图 2 所示为 GD-300 系列玻璃剂量计 0.2 mGy~2 Gy 剂量范围内剂量线性实验结果。经统计分析, 玻璃剂量计的照射剂量与测读值的相关系数 (R^2) 为 1, 这表明玻璃剂量计在 0.2 mGy~2 Gy 的剂量范围内具有非常理想的线性关系。在此实验中, 玻璃剂量计的读出剂量 (y) 与所受辐射剂量 (x) 的关系为 $y = 1.0269x + 0.0286$; 28.6 μGy 的截距反映出玻璃剂量计的固本底。

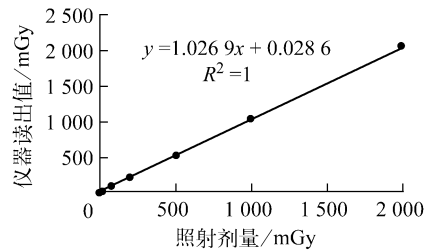


图 2 GD-300 系列玻璃剂量计的剂量线性曲线
Fig. 2 Dose linearity for GD-300 series of RPLGD

3.2 均匀性

图 3 所示为 3 组 (各 20 个) GD-300 系列玻璃剂量计分别在 0.2、20 及 200 mGy 剂量照射条件下, 不同剂量计的读数与同组剂量计的读数均值的比较结果, 它们的一致性偏差分别在 $\pm 1.7\%$ 、 $\pm 1.3\%$ 、 $\pm 1.1\%$ 范围内。这说明 GD-300 系列玻璃剂量计的均匀性很好, 可保证在实际应用中的测量精度。

3.3 重复性

本研究对 3 组 (各 20 个) GD-300 系列玻璃剂量计分别照射 0.2、20 和 200 mGy 剂量并经预热处理后, 对每个剂量计重复测读了 10 次。表 1 列出各剂量计测读值的变异系数。从表 1 可知, 变异系数的均值随照射量的减少有所增

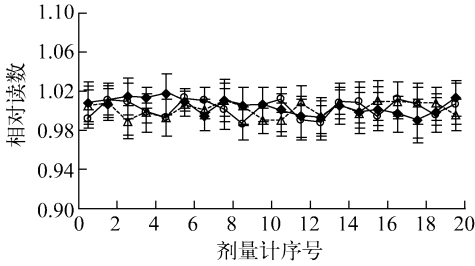


图3 GD-300 系列玻璃剂量计的均匀性

Fig. 3 Uniformity for GD-300 series of RPLGD
◆—0.2 mGy; ○—20 mGy; △—200 mGy

加,但均小于 1,说明 GD-300 系列玻璃剂量计具有良好的可重复测量性能。

表 1 GD-300 系列玻璃剂量计测读值的重复性

Table 1 Reproducibility for GD-300 series of RPLGD

照射剂量/ mGy	剂量计个数	变异系数	
		范围	均值±1σ
0.2	20	0.43~1.17	0.83±0.19
20	20	0.32~1.01	0.62±0.18
200	20	0.43~0.93	0.59±0.15

3.4 自身衰退

图 4 所示为 GD-300 系列玻璃剂量计经 200 mGy 的 γ 射线照射并经预热处理后置于室温(22~31 °C)铅室内的自身衰退曲线。GD-300 系列玻璃剂量计在两个月内的自身衰退份额小于 1.1%,表明 GD-300 系列玻璃剂量计的自身衰退影响在长时间测量情况下可被忽略。

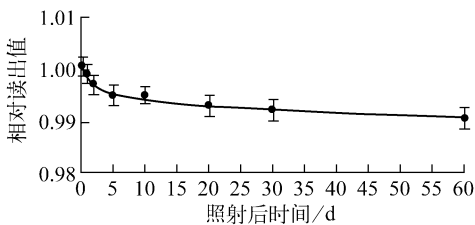


图 4 GD-300 系列玻璃剂量计在 60 d 内的衰退曲线

Fig. 4 Fading curve for GD-300 series of RPLGD in 60 days

3.5 能量响应

GD-300 系列玻璃剂量计能量响应结果示于图 5。从图 5 可看出,在 30~1 250 keV 范围内,有能量补偿的 GD-351 玻璃剂量计的能量

响应基本稳定;而无能量补偿的 GD-301 玻璃剂量计的能量响应变化范围较大。以 662 keV 的 ^{137}Cs γ 射线的能量响应为例,GD-351 和 GD-301 玻璃剂量计的能量响应变化范围分别为 -8%~15% 和 0%~247%。因此,在诊断放射学中无能量补偿的玻璃剂量计应慎用,或应进行必要修正。

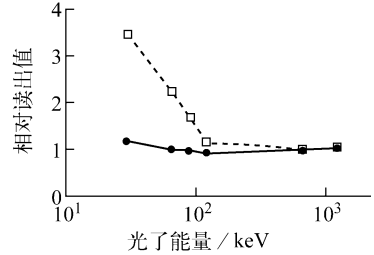


图 5 GD-300 系列玻璃剂量计的能量响应曲线

Fig. 5 Energy response for GD-300 series of RPLGD
□—GD-301(无能量补偿);●—GD-351(有能量补偿)

4 结语

通过实验研究,掌握了 GD-300 系列辐射光致发光玻璃剂量计的主要辐射剂量学性能,为推广应用该剂量计打下了基础。如今的辐射光致发光玻璃剂量计已具备相当优良的辐射剂量学特性,具有受辐射照射后可重复多次测量、自身衰退少、批内的均匀性好等优点。由于玻璃剂量计材质的有效原子序数较高,无能量补偿的玻璃剂量计对低能辐射场能量响应的偏差较大,所以,用于测量医用诊断 X 射线范围的剂量时,应采取能量补偿措施。在各种放射防护监测、放射性工作人员的职业照射个人剂量监测,受检者与患者的医疗照射剂量监测,环境辐射剂量的测量,以及核电厂周围环境长期累积辐射剂量的监控等场合,推广应用辐射光致发光玻璃剂量计有其优越性。

参考文献:

[1] MOSCOVITCH M, JOHN T J S, CASSATA J R, et al. The application of LiF: Mg, Cu, P to large scale personnel dosimetry: Current status and future directions [J]. Radiat Prot Dosim, 2006, 119(1-4): 248-254.
[2] 郑钧正. 国产氟化锂片型热释光探测器性能比较研究[J]. 辐射防护, 1997, 17(3): 225-231.

- ZHENG Junzheng. A comparative study on dosimetric properties of LiF thermoluminescence detectors produced in China[J]. Radiat Prot, 1997, 17(3): 225-231(in Chinese).
- [3] BEKER K. High γ -dose response of recent silver-activated phosphate glasses [J]. Health Phys, 1965, 11(6): 523-529.
- [4] PIESCH E, BURGKHARDT B, VILGIS M. Photoluminescence dosimetry-progress and state of art[J]. Radiat Prot Dosim, 1990, 33(1-4): 215-226.
- [5] OBERHOFER M, SCHARMANN A. 应用热释光剂量学[M]. 北京:中国计量出版社,1988: 118-120.
- [6] AKSELROD M S, KORTOV V S, KRAVETSKY D J, et al. Highly sensitive thermoluminescent anion-defective α -Al₂O₃:C single crystal detector[J]. Radiat Prot Dosim, 1990, 32: 15-21.
- [7] YUKIHARA E G, MITTANI J C, VANHAVERE F, et al. Development of new optically stimulated luminescence neutron dosimeters [C/OL]//15th International Conference on Solid State Dosimetry, Delft, The Netherlands, July 8-13, 2007; international solid state dosimetry organization. [2007-08-05]. <http://www.ssd15.org/abstracts/2-06.doc>.
- [8] YASUDA H, FUJITAKA K. Solid-state integrating detectors as an indicator of biological doses from HZE particles[J]. Advances in Space Research, 2002, 30(4): 927-932.
- [9] ARAKI F, MORIBE N, SHIMONOBU T, et al. Dosimetric properties of radiophotoluminescent glass rod detector in high-energy photo beams from a linear accelerator and Cyber-Knife [J]. Med Phys, 2004, 31(7): 1 980-1 985.
- [10] 吴毅,王时进,郑钧正,等. 估算X线诊断受检者器官剂量的体模实验方法[J]. 辐射防护, 1987, 7(5): 335-340.
- WU Yi, WANG Shijin, ZHENG Junzheng, et al. An estimating method of organ doses from X-ray diagnostic examinations by phantom measurements [J]. Radiat Prot, 1987, 7(5): 335-340(in Chinese).
- [11] NAKAGAWA K, YODA K, SHIRAKI M, et al. Radiophotoluminescence dosimetry using a small spherical glass: A preliminary phantom study[J]. Radiat Prot Dosim, 2007, 123(2): 254-256.
- [12] BABA S, ITO T, TOYODA T, et al. Investigation of optimal fluoroglass preheat[J]. Jpn Radio Technol, 2002, 49(8): 810-815.