

中子气泡探测器性能改进及初步检验

张贵英, 吕 鹏, 倪邦发, 田伟之, 李 丽, 王平生, 黄东辉, 刘存兄, 肖才锦

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

摘要:对自制中子气泡探测器进行了改进。对改进后探测器的个人中子剂量响应以及重现性、批内一致性在国防科学技术工业委员会放射性计量一级站的中子仪表刻度实验室进行了检验。结果显示,探测器的重现性、剂量响应和批内一致性等主要特性有了大幅提高。

关键词:气泡探测器; 剂量响应; 重现性

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2010)10-1266-04

Performance Improvement and Preliminary Test on Neutron Bubble Detector

ZHANG Gui-ying, LÜ Peng, NI Bang-fa, TIAN Wei-zhi, LI Li, WANG Ping-sheng,
HUANG Dong-hui, LIU Cun-xiong, XIAO Cai-jin

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-50, Beijing 102413, China)

Abstract: The design of the neutron bubble detectors developed by our group was upgraded. The dose response, reproducibility, and in-batch consistency of the renovated detectors were tested in the Department of Radioactive Metrology, China Institute of Atomic Energy. The results indicate that these renovations have brought an important upgrade in overall performances of our bubble detectors.

Key words: bubble detector; dose response; reproducibility

中子气泡探测器是积分型、便携式、积极中子剂量计,具有阈能低、灵敏度高、可进行直接可视的测量、对 γ 射线不灵敏、可反复使用等优点,被认为是唯一能够满足国际放射防护委员会ICRP60号出版物要求的个人中子剂量计^[1]。

中子气泡探测器由固化体(弹性水溶性胶体)、过热液滴、添加剂和施压装置组成。将无数过热液体微滴均匀分散在固化体中即形成了

一气泡探测器。旋下探测器施压装置上的旋帽,探测液滴被敏化。此时,探测器内的液滴象无数个很小的气泡室,当中子与探测器物质相互作用时,产生带电粒子,带电粒子的能量损耗引发液滴爆炸成为目视可见的气泡。气泡数目与入射中子数量在一定范围内成正比,因而,根据气泡数可推算出中子剂量。气泡象微滴一样被硬弹性固体限制在微滴原位置不动,记录气泡数后,旋上施压装置上的旋帽,施加压力,还

可使气泡在外压的作用下重新变回液滴。因此,气泡探测器可重复使用^[2]。

2005年,中国原子能科学研究院研制成功了具有自主知识产权的中子气泡探测器^[3]。然而,探测器存在照射后产生气泡的形状大小不一、中子监测结果的重现性较差等问题。本工作对自制中子气泡探测器进行改进。

1 中子气泡探测器改进

对自制中子气泡探测器进行了3方面的改进。

1) 优化过热液体,改善气泡性状和探测器的批内一致性

原来使用F-12作为过热液体的中子探测阈值较低,且在本实验室研制的固化体系中有微量溶解,对照射后产生的气泡形状和探测器样品的批内一致性影响较大。

本工作选择了一种新的组合型过热液体。与F-12相比,该液体不仅在本实验体系中的溶解度更低,且沸点也更低,对大气臭氧层的破坏相对较小。实验结果显示,此种过热液体照射后的起泡圆,不会出现雪花片状。探测器的批内一致性亦得到了改善。

2) 采用直筒型容器,改进探测器固化体和过热液滴受压均匀性

无论是目视直接读数还是自动计数仪器读数,均需透过探测容器壁来观察气泡,因此,对探测容器的透明度要求很高。探测容器还需耐压:一方面,储存探测器时需能维持过热微滴的压力;另一方面,探测器使用过后,需要加高压将气泡压回成液滴,这时试管需能承受将气泡压回液滴的压力。

新探测容器使用聚碳酸酯(PC)材料。与原使用的玻璃相比,PC具有优异的抗冲击强度、稳定性、光泽度,具有抑制细菌、阻燃及抗污染等特性,且有很好的机械性能。

图1示出气泡探测器容器设计图和实物图。新设计将旧的螺口容器改成直筒型PC容器,从而达到使探测器固化体和过热液滴均匀受压的目的,照射后产生的裂片、雪花片较少而多为圆泡,方便记录及定量。

3) 改进施压装置,提高施压可控性和测量结果的重复性

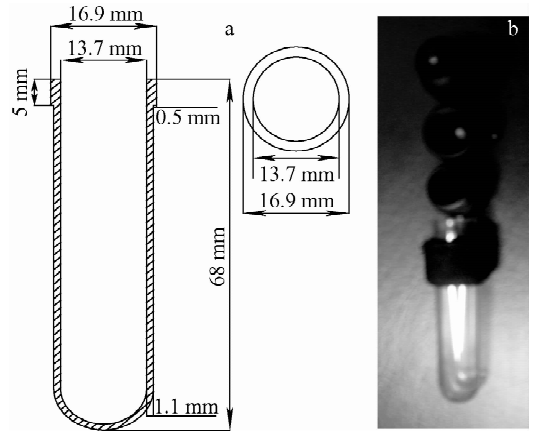


图1 气泡探测器容器设计图(a)和实物图(b)

Fig. 1 Plan (a) and photograph (b) of bubble detector's container

在气泡探测器施压装置设计中,顶杆、螺套采用LY12材料;旋塞、螺纹连接件采用LF6材料;重施压弹簧采用65-Mn制成;密封垫采用弹性和韧性极好的硅胶垫,以保证密封固化体,使探测器在重复使用时,避免了手工操作带来的压力难于控制的弊端,使探测器的测量重复性和精密度均有了很大提高。

2 性能检验结果与讨论

2.1 重现性检验

1) 同一探测器重现性检验

实验在经石蜡慢化后的²⁵²Cf中子源上进行。测试条件为:在固定照射位置对某个自制探测器(已敏化)进行7次辐照,每次辐照时间10 min,每次辐照结束立即读出探测器内产生的气泡数,然后将生成的气泡压回成液滴,放在25.5℃恒温环境23 h后,进行下次辐照检验。

测试结果显示(图2),探测器在照射位置辐照10 min后,平均产生23.3个气泡,最大相对偏差为13.3%。改进前,探测器在相同测试条件下得到的最大相对偏差为45.6%。与改进前(图2a)的监测结果比较,探测器的重现性明显改善,此探测器在测试条件下可重复使用。

2) 不同探测器重现性检验

实验采用²⁴¹Am-Be中子源参考标准场(JL-1,源强 $2.67 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$,注量-剂量当量平均转换系数为 $4.11 \times 10^{-10} \text{ Sv} \cdot \text{cm}^2$)。气泡探测器紧贴标准体模(材料为有机玻璃,尺寸为

30 cm×30 cm×15 cm, 30 cm×30 cm 平面垂直于射线)的中心部位,源的几何中心与体模前表面距离为 2 m。直接照射编号为 1、11、13、

15、A2 的 5 个中子气泡探测器达到 10 μSv,记录探测器产生的气泡数目,然后在相同条件下,对每个探测器重复 4 次辐照。

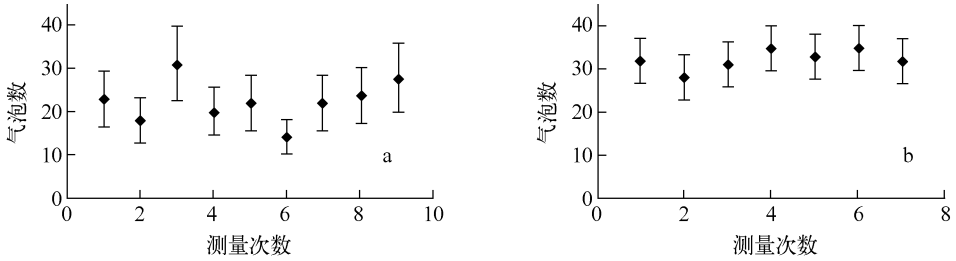


图 2 探测器改进前(a)、后(b)的稳定性

Fig. 2 Results of stability test for bubble detectors before (a) and after (b) improvement

表 1 列出 5 个探测器在 10 μSv 剂量下进行 4 次重复实验的测试结果。对于每个探测器,计算气泡数平均值 \overline{M}_i 、标准偏差 s_j 和标准偏差置信区间的半宽度 $I_{s,j}$ 。其中, $I_{s,j}$ 为:

$$I_{s,j} = t_{ns} s_j \sqrt{0.5/(n_s - 1)}$$

其中: t_{ns} 为 Student 因子; n_s 为测量次数。

根据 ISO 标准, $100(s_j + I_{s,i})/\overline{M}_i$ 小于 25% 认为合格^[4]。从表 1 可看出,测试的 5 个探测器全部通过测试。改进后的探测器可实现反复使用。

2.2 剂量响应检验

检验辐射场和探测器测试位置与不同探测器重现性检验相同。用 ²⁴¹Am-Be 中子源直接照射中子气泡探测器达到要求的个人中子剂量当量值,计算探测器气泡数与探测器接受到的照射剂量的比值,得到探测器的探测灵敏度——单位个人中子剂量当量的气泡数(μSv⁻¹)。

个人中子剂量当量分别为 5、10、20、30、40 μSv (距离 2 m, 中子剂量当量率为 81 μSv/h) 时,图 3 示出 14 组改进型探测器的剂量响应实

验结果。拟合直线为 $y=1.581x$, y 和 x 分别表示气泡数和剂量,相关系数为 0.993,与改进前图 3a 的剂量响应监测结果相比,探测器的剂量响应明显改善。实验结果证明,新工艺的采用极大地降低了测量结果的不确定度。

2.3 批内一致性检验

采用 ²⁵²Cf 中子源和 2×1.7 MV 串列加速器产生的 14.8 MeV 单能中子源,按照 ISO 标准,对自制的 12 批中子气泡探测器批内一致性进行测试,具体实验设计和结果详见参考文献[5]。结果表明,在测试的 12 批探测器中,只有 1 批未通过 ISO 标准测试,证明探测器制作成品率高。改进后的制作方案可用于批量生产。

3 结论

1) 过热液滴选用复合液体代替单一液体,较好地解决了 F-12 溶解度过大的问题;通过把液滴打得更碎、气泡变小来达到使过热液滴均匀分布和气泡变圆的目的。

表 1 改进后自制中子气泡探测器测试结果的重现性

Table 1 Results of reproducibility test for bubble detectors after improvement

编号	n_s	\overline{M}_i	s_j	$I_{s,i}$	$100(s_j + I_{s,i})/\overline{M}_i$	测试结果
1	4	19	2.309	1.03	17.57	合格
11	4	18.75	1.708	0.76	13.17	合格
13	4	18	1.633	0.73	13.11	合格
15	4	16.5	1.732	0.77	15.17	合格
A2	4	18.5	0.577	0.26	4.51	合格

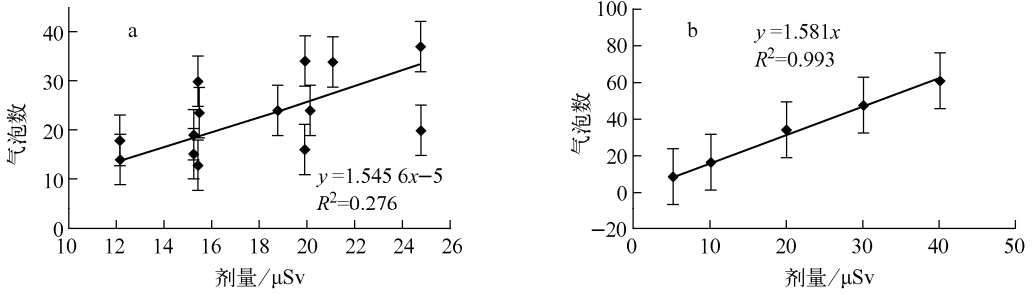


图 3 改进前(a)、后(b)个人中子剂量响应曲线

Fig. 3 Number of bubbles vs neutron dose for bubble detectors before (a) and after (b) improvement

2) 把原来的螺口容器改成直筒型 PC 容器,达到使探测器固体和过热液滴均匀受压的目的,使照射后产生的气泡主要为圆形(很少有碎片和雪花片形气泡),提高了气泡数测定的准确性。

3) 硬铝材料的施压头和高弹性硅胶密封垫的使用改善了施压系统的密封性,使内部水分不易挥发,从而延长了探测器寿命,同时也使得探测的重复性得到了很大提高。

4) 采用以上 3 种改进措施后,探测器的重现性和剂量响应均较改进前有显著改善,批内一致性通过了检验^[5]。

参考文献:

[1] ING H, NOULTY R A, MCLEAN T D. Bubble detectors—A maturing technology[J]. Radiation Measurement, 1997, 27(1): 1-11.
 [2] ING H, MORTIMER A. Space radiation dosimetry using bubble detectors[J]. Adv Space Res, 1994, 14(10): 73-76.

[3] 张贵英,倪邦发,李丽,等. 利用核径迹技术研制个人中子剂量气泡探测器[J]. 核技术, 2005, 28(9): 663-666.
 ZHANG Guiying, NI Bangfa, LI Li, et al. A study of personal neutron dosimetry-solid state bubble detector based on nuclear track technique [J]. Nuclear Technology, 2005, 28(9): 663-666 (in Chinese).
 [4] VANHANVERE F, D'ERRICO F. Standardization of superheated drop and bubble detectors [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2002, 101(1-4): 283-287.
 [5] 张贵英,倪邦发,吕鹏,等. 自制个人中子气泡探测器特性的批内一致性[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(6): 543-544.
 ZHANG Guiying, NI Bangfa, LÜ Peng, et al. Study on batch homogeneity of home-made personal neutron-bubble detectors[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(6): 543-544(in Chinese).