

文章编号: 0258-0926(2016)05-0171-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.05.0171

堆舱可见光-红外监测样机核辐射下成像研究

周旭华¹, 伊雄鹰¹, 胥建国¹, 高原²

1. 北京核化安全研究所, 北京, 100077; 2. 北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京, 100871

摘要:在北京大学 4.5 MV 静电加速器上, 通过氘离子束流轰击厚铍靶产生中子与 γ 射线来模拟堆舱的核辐射环境。在此环境下, 考验了堆舱可见光-红外监测样机的 CCD 可见光成像机芯、热敏电阻型红外成像机芯以及睿星 CMOS、CCD 成像器件在辐射环境下的成像性能。实验结果表明: 热敏电阻型红外热成像器件的抗核辐射性能优于 CCD、CMOS 成像器件且适合在堆舱环境中使用; CMOS 成像器件的抗辐射性能优于 CCD 器件, 在堆舱中应采用抗核辐射加固的 CMOS 成像器件作为可见光成像器件; 为确保整机运行可靠, 还应对控制电路作抗核辐射加固。

关键词: 船用核动力装置; 堆舱; 红外热成像; 核辐射

中图分类号: TL329.2 **文献标志码:** A

Exploration of Imaging for Visible Light and Infrared Prototype Monitor of Reactor Cabin under Nuclear Radiation

Zhou Xuhua¹, Yi Xiongying¹, Xu Jianguo¹, Gao Yuan²

1. Nuclear Safety and Chemical Defense Institute, Beijing, 100077, China;

2. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing, 100871, China

Abstract: The nuclear radiation environment in the reactor cabin is simulated by neutrons and gamma rays engendered by the deuteron beam bombarding thick Be target in the 4.5 MV Van de Graaff electrostatic accelerator at Peking University. In this environment, the imaging characteristics of CCD visible light imaging hardware and thermal-sense resistor infrared imaging hardware of the visible light and infrared prototype monitor of the reactor cabin is tested. At the same time, the imaging capability of RUIXING CMOS and CCD imaging hardware is also tested. The experiment results indicate: the anti-radiation capability of the thermal-sense resistor infrared imaging hardware excels the CCD and CMOS imaging hardware and adapts to the nuclear radiation environment in the reactor cabin; the anti-radiation capability of CMOS excels that of CCD and should be used as the visible light imaging hardware for the monitor in the reactor cabin; in order to improve the working reliability, more reinforcement of the anti-radiation should be taken on the control circuit.

Key words: Marine nuclear reactor, Reactor cabin, Infrared imaging, Nuclear radiation

0 引言

反应堆堆舱目前使用的传统工业电视虽能直接观察部分设备运行状态及压力边界关键部位的泄漏情况, 但这仅为外观监视, 而且反应堆、一回路及辅助系统泄漏的高温高压水由于直接闪蒸, 可不形成气雾, 使得工业电视系统对设备泄

漏的监测存在盲区。为解决上述问题, 课题组研制了“可见光-红外”双视野监测样机。

反应堆堆舱是一个中子- γ 射线混合辐射环境。监测系统在堆舱内工作时, 必然会遭受核辐射而发生各种辐射效应, 甚至可造成其工作异常甚至故障。因此, 需解决其在核辐射环境下持续、

收稿日期: 2015-11-18; 修回日期: 2016-06-15

作者简介: 周旭华(1981—), 男, 博士, 现从事核动力运行安全研究

可靠工作问题。监测样机的可见光像机芯为电荷耦合 (CCD) 器件, 此类器件抗辐射性能在文献中有较多报道, 总体而言, 商用 CCD 的辐射容限大致在 10 Gy (Si) 量级, 国内通过结构优化(如采用 N-埋沟结构)、改进栅氧化工艺及栅氧化经过抗辐射加固后, 国内的 CCD 辐射容限为数十个 Gy^[1,2]。红外成像机芯在核辐射环境下的工作性能如何未见有报道。本研究在北京大学 4.5 MV 静电加速器上^[3,4]通过氦离子束轰击厚铍靶发生 ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ 反应产生中子、混合辐射环境; 然后将样机置于该环境中, 考验其成像性能。

1 实验设备

1.1 可见光-红外双视监测系统样机

可见光-红外双视监测系统样机主要由前端探头部分(包括红外热成像机芯、可见光 CCD 机芯、云台、室外防护罩及电源), 中间网络传输部分, 后端数据存储、处理及故障诊断部分所组成。在实验中, 前端探头部分布置在中子实验室大厅、后端数据处理及视频监控用笔记本电脑则布置在控制室。

1.2 4.5 MV 静电加速器

北京大学 4.5 MV 静电加速器的离子束流强度 2~10 μA , 具有配套的、适应不同能区的中子注量测量与监测系统。与加速器配套的有屏蔽良好、宽敞的低本底中子大厅(20 m \times 12 m \times 8 m), 钢筋水泥防护墙厚 1 m^[4]。在本实验中, 该静电加速器用于产生氦离子束流。

1.3 厚铍靶

厚铍靶横截面直径约 1.6 mm、长约 1 mm。厚铍靶在氦核的轰击下, 产生核反应: ${}^9\text{Be}+{}^2\text{H}$ ${}^{10}\text{B}+n+$, 生成自由中子与射线。

1.4 BF_3 中子计数管

BF_3 中子计数管布置在正对厚铍靶 3.1 m 处, 用于对中子源强进行监测。根据其读数可反推出中子源强和吸收剂量率。

1.5 CMOS 成像器件

实验选用睿星公司的 CCD 和互补金属氧化物半导体 (CMOS) 成像器件。在实验中, CCD、CMOS 器件放置在红外热成像监测样机旁边。通过 CCD 器件、CMOS 器件和热敏电阻型红外热成像器件在核辐射场中的成像质量比较, 对比分析这 3 类成像器件的抗辐照性能。

2 实验方法和过程

利用 4.5 MV 静电加速器加速氦离子后轰击 Be 靶, 产生中子、射线混合核辐射环境, 并将监测样机放置在该核辐射环境下进行成像性能考验。利用 BF_3 计数管探测出中子强度; 通过调整加速器束流强度来调节核辐射场强度; 通过调整设备与辐射源之间的距离来模拟各种剂量率对设备成像性能的影响; 通过累计辐照时间检验累积剂量对设备性能的影响, 并比较分析 CCD 成像器件、CMOS 成像器件、热敏电阻型红外热成像器件的抗辐照性能优劣。实验历时 4 d, 加速器运行时间超过 40 h, 监测样机累计辐照时间 25.16 h。实验中, BF_3 长中子计数管位于束流方向 3.1 m 处计数, 在此位置 BF_3 计数管的几何效率为 2.48×10^{-6} 。若此时 BF_3 计数管单道定标器计数为 Q , ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ 反应产生的 4 空间中子总产额为:

$$S = Q / 2.48 \times 10^6 \quad (1)$$

式中, Q 为计数管计数, s^{-1} ; S 为中子总产额, n/s 。如红外机芯 Ge 玻璃与中子源的距离为 r , 则此时中子注量率 Φ 为:

$$\Phi = S / (4\pi r^2) \quad (2)$$

根据蒙特卡洛粒子输运程序 MCNP 计算以及有关实测结果, 3 MeV 左右氦核轰击厚铍靶产生 ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ 核反应, 每产生一个中子伴随产生 3 个光子, 的平均能量为 2 MeV, 此时的吸收剂量率 X (单位: $\mu\text{Gy/s}$) 为:

$$X = \Phi \times 2.3 \times 10^{-5} \quad (3)$$

对于监测样机的红外热成像机芯而言, 在累计辐照时间 25.16 h 内, 所受 Φ 为 $1.60 \times 10^4 \sim 9.27 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, X 为 0.370~108.71 $\mu\text{Gy/s}$, 累计中子注量为 $2.59 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 累计吸收剂量为 59.7 Gy。对于监测样机的可见光 CCD 机芯而言, 由于辐射源 Be 靶并不直接与之正对, 其与辐射源的距离要比红外热成像机芯离辐射源的距离要远, 总体而言, 可见光 CCD 机芯所受辐照强度要比红外热成像机芯小。

睿星 CCD 和 CMOS 成像器件在第 3 d 加入实验。在开始约 20 min 内, 两者均放置在监测样机云台底座旁边。CMOS 距离辐射源约 35 cm, CCD 距离辐射源约 45 cm。20 min 后, CMOS 被放置到红外监测样机顶部, CCD 的位置不变, 累计辐照时间 960 min。经估算, CCD 累计中子注

量为 $1.19 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ，累计吸收剂量为 0.273 Gy；CMOS 累计中子注量为 $1.06 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ，累计吸收剂量为 2.434 Gy。

在辐照实验过程中，为了便于识别中子及射线在视频的视场图像中的斑点，使用黑胶布将镜头封住。

3 实验结果分析

实验结果表明：

(1) 与核动力装置堆舱内的核辐射环境比较，4.5 MV 静电加速器厚铍靶 ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ 反应产生的中子、混合辐射场能够模拟堆舱核辐射环境，且总体比堆舱实际核辐射环境更加恶劣。

(2) 未作抗核加固的红外监测样机 CCD 机芯对核辐射非常敏感，成像质量受核辐射影响明显。即使在 $\Phi(10^4 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ 和 $X(<15 \text{ }\mu\text{Gy/s})$ 都非常低的情况下，其视频图像质量就受中子和 γ 影响明显。随着吸收剂量率和累计吸收剂量的增大，CCD 视频图像中的斑点迅速增加，在吸收剂量达到 4 Gy 左右时，斑点已经多到无法分辨物体轮廓程度，随着累积剂量的进一步增加斑点连成一片，最后完全无法分辨图像。

(3) 热敏电阻型非制冷焦平面红外热成像器件的抗辐照性能较好。在整个实验过程中，尽管辐照强度要比堆舱实际环境更加恶劣，且红外机芯实际受到的辐照强度和累计辐照量都比 CCD 机芯要大，但红外机芯的热成像质量良好，对温度变化的识别灵敏，测温准确，图像无噪点。

(4) 监测样机的控制电路（如红外主板、网络模块等）会受到核辐射干扰，当核辐射相对较小时（如 X 不超过 $200 \text{ }\mu\text{Gy/s}$ ，实验中 X 在 $144 \text{ }\mu\text{Gy/s}$ 左右时，样机连续工作 3 h 无异常）；当核辐射强度增大时（如 X 超过 $400 \text{ }\mu\text{Gy/s}$ ），核辐射的干扰可造成系统死机，但断电重启后，即可恢复正常工作。从实验结果可初步判断，在堆舱实际核辐射强度下（通常在 $100 \text{ }\mu\text{Gy/s}$ 以下），核辐射对控制电路影响较小，监测样机应可连续运行。如需进一步提高其运行可靠性，应对控制电路进行抗核辐射加固设计。

(5) CMOS 器件的抗辐射性能要优于 CCD 器件。在基本相同的辐射强度下，CCD 器件的斑

点增加速度比 CMOS 器件快的多。在整个实验过程中，CMOS 所受辐照强度及累计辐照量均为 CCD 的 10 倍左右，但最后两者视频图像中的斑点数相差不多，成像质量相当，说明 CMOS 的抗辐射性能要明显优于 CCD。

(6) CMOS 及 CCD 器件所受辐照损伤的一部份是可恢复的，且成像质量恢复水平与累计辐照剂量密切相关。实验 9 d 后，红外监测样机的 CCD 机芯已恢复基本的成像功能，但视频图像中还存在明显斑点，成像质量要比辐照前差很多。由于睿星 CCD 和 CMOS 器件所受辐照相比红外机芯 CCD 要小很多，在实验 9 d 后，两者视频图像中所存斑点数要比红外机芯 CCD 的少很多，成像质量较好。

4 结论

监测样机红外机芯在累计中子注量达到 $2.59 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 、累计吸收剂量达到 59.7 Gy 时，成像质量未见有影响。尽管监测样机 CCD、睿星 CCD、CMOS 的累计辐射量要比红外成像机芯小的多，但成像质量已经受到明显影响，普通 CCD 在累计吸收剂量达 4 Gy 时，图像中的斑点已经连成一片。热敏电阻型红外热成像器件的抗核辐射性能要明显优于 CCD、CMOS 成像器件。另外，CCD、CMOS 两种成像器件相比，CMOS 的抗辐射性能更好。

红外监测样机的红外机芯适合在堆舱环境中使用，现有 CCD 机芯应采用抗核辐射加固的 CMOS 成像器件进行替换，为确保整机运行的可靠性，还应进一步对控制电路作抗核辐射加固设计。

参考文献：

- [1] 韩春雷，张彦敏，陈兵. 新型耐辐射摄像机的设计[J]. 舰船科学技术，2013, 35(6): 113-116.
- [2] 杜霆. 基于 CMOS 的耐辐射图像采集系统[D]. 中国科学院大学，2013.
- [3] 王建勇，巩玲华，杨向军. 北京大学 4.5 MV 静电加速器运行与改进[J]. 原子能科学技术，2008, 42: 229-232.
- [4] 胥建国. 加速器中子源中子照相系统屏蔽问题的研究[D]. 北京大学. 2008.

（责任编辑：王中强）