

doi: 10.7690/bgzd.2025.08.013

基于国产大尺寸 NaI(Tl) 探测器的全身计数器测量方法

朱岳武¹, 廖 鹏², 刘尔聃¹, 李 基¹, 徐 婕¹, 向叶舟²

(1. 中国中原对外工程有限公司设备采购部, 北京 100044;

2. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能测控事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为进一步降低采购成本, 提升设备的维护性, 打破国外垄断, 通过优化晶体的封装耦合方式提升国产大尺寸 NaI(Tl) 探测器的探测性能。分别针对搭载国产和进口大尺寸 NaI(Tl) 探测器的全身计数器系统开展分辨率、短期稳定性等实验对比测试。实验结果表明: 通过优化晶体的封装耦合方式制造的国产大尺寸 NaI(Tl) 探测器的能量分辨率小于 8%, 峰位变化在 $\pm 1\%$ 峰位以内, 能够满足测量要求。

关键词: NaI(Tl) 探测器; γ 能谱; 全身计数器

中图分类号: TN32 **文献标志码:** A

Whole Body Counter Measurement Method Based on Domestic Large Size NaI (Tl) Detector

Zhu Yuewu¹, Liao Peng², Liu Erdan¹, Li Ji¹, Xu Jie¹, Xiang Yezhou²

(1. Department of Equipment Purchasing, China National Nuclear Corporation Overseas Ltd., Beijing 100044, China;

2. Department of Intelligent Measurement and Control, Automation Research Institute Co., Ltd. of
China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to further reduce the procurement cost, improve the maintainability of the equipment and break the monopoly of foreign countries, the detection performance of the domestic large-size NaI (Tl) detector is improved by optimizing the packaging coupling mode of the crystal. The resolution and short-term stability of the whole body counter system equipped with domestic and imported large-size NaI (Tl) detectors were tested and compared. The experimental results show that the energy resolution of the homemade large-size NaI (Tl) detector is less than 8%, and the peak position variation is within $\pm 1\%$, which can meet the measurement requirements.

Keywords: NaI (Tl) detector; γ energy spectrum; whole body counter

0 引言

在核电站运行过程中, 工作人员可能受到来自核反应堆、核燃料处理等环节产生的放射性物质的照射。这些放射性物质可能通过吸入、食入或皮肤接触等途径进入人体, 对人体健康造成潜在威胁。为及时发现并控制这种潜在威胁, 必须对工作人员进行定期的内照射监测。全身计数器作为个人内照射辐射监测的重要设备, 能够准确测量工作人员体内的放射性物质含量, 为评估其健康状况和制定防护措施提供重要依据^[1-4]。

近年来, 我国核电事业蓬勃发展, 核电站数量不断增加, 对辐射安全监测设备的需求日益旺盛。目前, 市场上全身计数器的探测器组件主要依赖进口, 不仅成本高, 而且在仪器的维护等方面也面临诸多不便, 容易受到国际形势的影响。

探测器组件是全身计数器的核心部件之一, 其性能直接影响到设备的测量精度和稳定性。目前,

常见的探测器类型有半导体探测器和闪烁体探测器。全身计数器的半导体探测器主要为高纯锗探测器, 其能量分辨率优越, 但其探测效率较低, 国内暂时还没有该晶体成熟的制备技术^[5]。闪烁体探测器使用的闪烁体材料分为有机和无机 2 种。有机闪烁体通常是液体闪烁体或塑料闪烁体。无机闪烁体通常是由单晶或多晶材料制成。一些常见的无机闪烁体材料包括碘化钠 (NaI)^[6]、碘化铯 (CsI)、溴化铯 (CsBr3) 和溴化镧 (LaBr3) 等^[7]。选择闪烁体探测器取决于具体的应用和测量的辐射特性。溴化镧探测器本征能量分辨率最高, 但其自身的本底计数率较高, 在测量低放射性活度的人体时, 对测量结果影响较大, 而碘化铯探测器自身的本底计数率较低, 但其相对光输出较少; 溴化铯探测器造价昂贵, 与同等体积碘化钠晶体相比, 其造价远超碘化钠晶体。综合各方面因素, NaI(Tl) 探测器为最佳选择。

目前, 大尺寸 NaI(Tl) 晶体采用热锻压多晶生

收稿日期: 2024-09-06; 修回日期: 2024-10-05

第一作者: 朱岳武(1988—), 男, 湖南人。

长技术，当晶体体积大于 1 L 时，生长晶体出现裂痕几率会迅速增大，裂痕会影响光收集的均匀性并使脉冲幅度分辨率变差。目前国内少数厂家可生产大尺寸 NaI(Tl) 晶体，但受限于晶体的生长及封装工艺不成熟等问题，国产的大尺寸 NaI(Tl) 探测器的性能在分辨率、稳定性等指标低于进口产品。

1 探测器封装设计

晶体的封装是晶体制备中关键环节，晶体探测器主要由晶体和光电倍增管组成，其中晶体是一类吸收高能粒子后发光的材料，其在空气环境中易出现潮解氧化现象，从而导致其物理形态发生退化和改变，导致其性能下降，因此闪烁晶体在作为探测器材料使用时必须对其进行封装，从而隔绝闪烁晶体与外界的联系^[8]。

晶体的封装结构包括晶体、弹性件、缓冲锥套、光学玻璃、光学耦合剂层、固定螺栓、密封圈、封装筒和压盖，其中缓冲锥套包括内锥套和外锥套。在闪烁晶体的底部与封装筒底部设置弹性件，弹性件的弹性伸缩方向沿上下方向延伸，该弹性键可以缓冲来自上下方向的冲击或振动；闪烁晶体左右两侧与封装筒内侧间填充了缓冲内、外锥套，该缓冲锥套可以缓冲来自四周的冲击或振动，避免晶体在使用过程中由于冲击或振动产生造成的损坏，封装结构如图 1 所示，封装结构爆炸如图 2 所示。

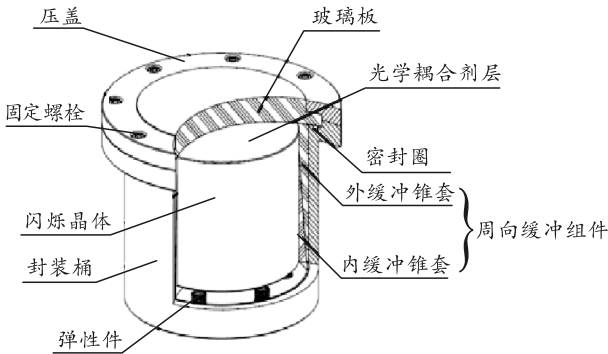


图 1 晶体的封装结构

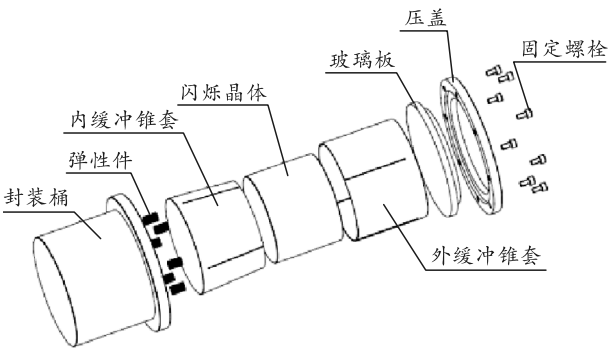


图 2 闪烁晶体的封装结构的爆炸

2 实验仪器和实验方法

2.1 实验仪器

实验中 NaI(Tl) 探测器组件主要由 NaI(Tl) 探测器、数字化多道组成，NaI(Tl) 探测器主要由 NaI(Tl) 晶体、光电倍增管等组成。图 3 展示了 NaI(Tl) 探测器组件的原理。图 4 和 5 分别为自研探测器组件和数字化多道的照片。

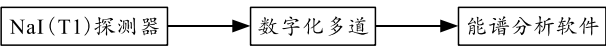


图 3 NaI(Tl) 探测器组件原理

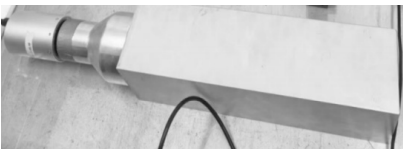


图 4 自研 NaI(Tl) 探测器组件实物



图 5 自研数字化多道外形

在实验过程中使用的屏蔽体为自行研制的全身计数器屏蔽体，设备的外形如图 6 所示，仪器的组成如图 7 所示。



图 6 屏蔽体外形

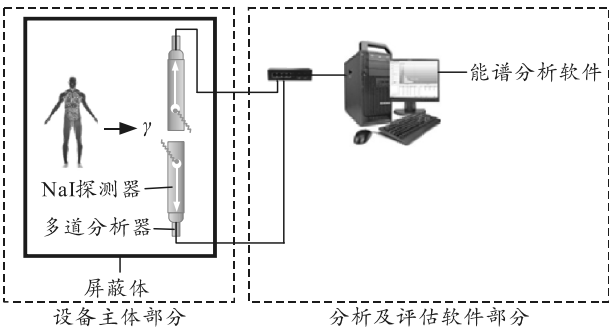


图 7 全身计数器组成

2.2 实验方法及实验结果

2.2.1 分辨率对比测试

将 ^{137}Cs 放射源置于屏蔽体测量腔中后部, 待 0.662 MeV 处能量峰的峰面积大于 10 000 个计数时, 停止测量, 选取 ROI 区, 双击 ROI 区, 计算能量分辨率值, 分辨率=半高宽/峰位。连续测量 3 次, 计算平均值。

从表 1 和 2 的测试结果显示, 自研的大尺寸 NaI(Tl)探测器测的分辨率均在 7.8%左右; 进口的大尺寸 NaI(Tl)探测器的分辨率均小于 7.5%, 国产大尺寸 NaI(Tl)探测器的分辨率差于进口探测器, 但分辨率已小于 8%, 满足绝大多数的使用环境要求。

表 1 自研 NaI(Tl)探测器能量分辨率实验结果

探测器名称	测量次数	半高宽/keV	峰位能量/keV	能量分辨率/%
上探测器	1	52.18	664.49	7.85
	2	56.25	663.45	7.72
	3	55.69	663.92	7.63
下探测器	1	52.34	665.17	7.86
	2	53.80	666.20	7.92
	3	54.00	666.01	7.80

表 2 进口 NaI(Tl)探测器能量分辨率实验结果

探测器名称	测量次数	半高宽/keV	峰位能量/keV	能量分辨率/%
上探测器	1	43.18	664.49	6.50
	2	46.25	663.45	6.97
	3	45.69	663.92	6.80
下探测器	1	51.34	665.15	7.40
	2	50.80	666.20	7.30
	3	50.00	666.01	7.50

2.2.2 短期稳定性

在短期稳定性实验中, 将 ^{137}Cs 放射源置于屏蔽体测量腔中后部位置, 使全谱计数率小于 500 s^{-1} 、峰位计数小于 10 000, 计算 661.66 keV 全能峰的峰位 X_1 。每次测量位置和测量时间相同, 每次时间间隔为 1 h, 计算每次测得的 661.66 keV 全能峰的峰位 $X_i(i=2, 3, 4, 5)$, 计算峰位漂移绝对值 $|X_i - X_1|$, 找出最大值 $|X_i - X_1|_{\max}$, 计算峰位相对漂移:

$$s = \frac{|X_i - X_1|_{\max}}{X_1} \times 100\%。 \quad (1)$$

表 3 和 4 的测试结果表明: 自研的大尺寸 NaI(Tl)探测器与进口的大尺寸 NaI(Tl)探测器的峰飘均在 1%以内, 表明自研的大尺寸 NaI(Tl)探测器与进口设备的差异不大。

表 3 自研 NaI(Tl)探测器短期稳定性测试

序号	^{137}Cs 标准峰位	实测 ^{137}Cs 峰位	峰位偏差/%
1	647	649	0.31
2	647	648	0.15
3	647	646	0.15
4	647	650	0.46
5	647	651	0.62
6	647	646	0.15
7	647	644	0.46
8	647	648	0.15

表 4 进口 NaI(Tl)探测器短期稳定性测试

序号	^{137}Cs 标准峰位	实测 ^{137}Cs 峰位	峰位偏差/%
1	666.12	663.32	-0.42
2	666.12	663.22	-0.44
3	666.12	664.64	-0.22
4	666.12	662.41	-0.56
5	666.12	666.12	0
6	666.12	666.88	0.11
7	666.12	666.17	0.01
8	666.12	664.78	-0.20

3 结论

笔者采用国产大尺寸 NaI(Tl)晶体, 晶体的封装工艺自制完成; 重点对封装后的国产大尺寸 NaI(Tl)探测器与进口大尺寸 NaI(Tl)探测器的分辨率、短期稳定性进行了相关实验。实验结果表明: 自研的国产大尺寸 NaI(Tl)探测器的能量分辨率小于 8%。短期稳定性测试结果显示: ^{137}Cs 的峰位变化在 $\pm 1\%$ 以内, 达到了国际同类产品技术水平, 能够满足全身计数器的使用要求。

参考文献:

- [1] 王悦. 核电厂职业内照射全身计数器自动化测量系统的研发与应用[J]. 辐射防护通讯, 2024, 44(3): 1-6.
- [2] 叶镕溪, 牛德青, 李林珊, 等. 放射性核素大气扩散模型研究综述[J]. 兵工自动化, 2024, 43(5): 57-59.
- [3] 孙小康. 核电厂外围辐射环境监测数据异常自适应预警[J]. 兵工自动化, 2024, 43(11): 44-46.
- [4] 何朝均. 压水堆核电机组给水流量控制优化[J]. 兵工自动化, 2024, 43(12): 23-25.
- [5] 朱显超, 林泉, 马远飞, 等. 高纯锗晶体的研究进展[J]. 稀有金属, 2020, 44(8): 876-885.
- [6] 龚蕾. NaI 型全身计数器内照射监测设备稳定性分析及稳谱措施[J]. 电工技术, 2022, (10): 107-108, 111
- [7] 林娜, 任文省, 江婷, 等. 无机闪烁体的研究进展[J]. 功能材料, 2017, 48(9): 9030-9037, 9042.
- [8] 王向阳, 李薇, 李瑞龙, 等. 大尺寸 NaI(Tl)晶体的热锻及封装[J]. 人工晶体学报, 2001, (3): 305-308.