



## 硼铝合金材料中子吸收性能检测设备的升级与应用研究

苏晓斌 侯龙 刘世龙 杨毅 王琦

### Upgrade and Application Research of Neutron Absorption Performance Testing Equipment for Boron Aluminum Alloy Materials

SU Xiaobin, HOU Long, LIU Shilong, YANG Yi, WANG Qi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023026>

#### 引用格式:

苏晓斌, 侯龙, 刘世龙, 杨毅, 王琦. 硼铝合金材料中子吸收性能检测设备的升级与应用研究[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(2):661–669. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023026

SU Xiaobin, HOU Long, LIU Shilong, YANG Yi, WANG Qi. Upgrade and Application Research of Neutron Absorption Performance Testing Equipment for Boron Aluminum Alloy Materials[J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(2):661–669. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023026

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [B<sub>4</sub>C-Al材料中子吸收性能检测设备研制](#)

Research on B<sub>4</sub>C-Al Material Neutron Absorption Testing Equipment

原子核物理评论. 2021, 38(3): 283–292 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020071>

#### [B<sub>4</sub>C-Al材料中子吸收性能检测技术研究](#)

Study on Neutron Absorption Testing Technology of B<sub>4</sub>C-Al Material

原子核物理评论. 2019, 36(4): 462–470 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.462>

#### [Gamma全吸收型BaF<sub>2</sub>探测装置中子屏蔽体与吸收体的研究](#)

Study of Neutron Shield and Absorber for Gamma Total Absorption Facility

原子核物理评论. 2020, 37(3): 771–776 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC30>

#### [基于2.5 MeV质子加速器BNCT装置的中子慢化材料性能模拟研究](#)

Simulation of Neutron Moderating Materials Performance Based on BNCT of 2.5 MeV Proton Accelerator

原子核物理评论. 2022, 39(3): 367–372 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2021073>

#### [氧化镁中子过滤器研究](#)

Research on MgO as a Neutron Filter

原子核物理评论. 2022, 39(2): 195–200 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2021080>

#### [中国先进研究堆中子科学平台发展现状及展望](#)

Current Status and Future Prospect of Neutron Facilities at China Advanced Research Reactor

原子核物理评论. 2020, 37(3): 364–376 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC36>

# 硼铝合金材料中子吸收性能检测设备的升级与应用研究

苏晓斌, 侯 龙, 刘世龙, 杨 毅, 王 琦

(中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413)

**摘要:** 将中国原子能科学研究院研制的核电厂乏燃料水池格架硼铝合金中子吸收材料检测设备进行升级改进, 研发了集成数据获取系统、传动系统和控制记录分析系统。该检测设备可适用于不同尺寸的样板的多点测量, 具有连续、快速、全面积检测的特点, 具有定点式检测和移动式检测两种模式。完成了  $20\text{ cm} \times 30\text{ cm}$  的悬挂样片、 $373\text{ cm} \times 19.5\text{ cm}$  的长板、 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  的方形样板和  $\Phi 5\text{ cm} \times 0.3\text{ cm}$  的圆形样板的检测工作, 并且对检测结果进行分析。该硼铝合金材料中子吸收性能检测设备为开展国产含硼中子吸收材料的无损检测研究奠定了基础, 为核电厂乏燃料水池的临界安全监测提供了有力保障。

**关键词:** 硼铝合金; 中子吸收材料; 无损检测

**中图分类号:** TL816.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.41.2023026

## 0 引言

中国原子能科学研究院核数据重点实验室根据中子透射法测量原理, 研制了  $\text{B}_4\text{C\_Al}$  材料中子吸收性能检测装置<sup>[1-4]</sup>。 $\text{B}_4\text{C\_Al}$  中子吸收材料是核电厂乏燃料高密度贮存格架以及运输容器的关键材料, 其作用是维持乏燃料的次临界状态。中子吸收材料中  $^{10}\text{B}$  面密度以及分布均匀性是衡量其中子吸收能力及其均匀性的关键指标, 该材料近几年刚刚完成国产化研制, 而其相关性能的检测技术及检测设备的缺乏限制了该材料工程应用的步伐。该检测设备的成功研制在国内填补了硼铝板  $^{10}\text{B}$  面密度及分布均匀性自动化检测的空白。本文第 1 部分主要介绍本文总体工作内容, 第 2 部分介绍辅助系统研发, 第 3 部分介绍检测技术的应用, 包括对整张样板的测量和对小样品的测量, 第 4 部分是对全文的总结。

## 1 总体工作

该装置的核心部分为中子探测器测量系统和 neutron 源, 同时配以中子慢化系统。在对设备的升级改进过程中研发了集成数据获取系统、传动系统、控制记录分析系统, 以实现连续、快速、全面积检测。在检测装备的设计过程中需要考虑中子源的选取和布局、中子探测器的选择以及中子源利用率的提高等几个方面的重要问题<sup>[5-11]</sup>。为了对乏燃料水池整张格架材料进行检验, 对检测设备进行了改进。为防止长板在检测过程中偏离行进轨道,

加长了检测面板台架长度并制造了限宽设备。为了研究中子吸收材料入堆辐照以后中子吸收性的变化, 分别检测了入堆前和入堆后的尺寸为  $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  的方形样板和尺寸为  $\Phi 50\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  的圆形样板的中子透射率, 并比较了其入堆前后  $^{10}\text{B}$  面密度的变化。因为样品尺寸太小只能用锂玻璃阵列中的一路探测器测量, 为了保证样品能与探测器对齐, 特别制作了与标准板尺寸相同的模板, 模板是将已有的  $\text{B}_4\text{C\_Al}$  样板中间切割成与待测样板尺寸相符的方形孔与圆形孔, 将样品嵌入到样板里进行测量。检测装置结构如图 1 所示。

## 2 辅助系统研发

### 2.1 数据获取系统

研发了计数电路, 从 neutron 源放出的中子经过慢化体慢化后被  $\text{B}_4\text{C\_Al}$  样品吸收, 中子探测器探测到穿过  $\text{B}_4\text{C\_Al}$  的中子形成脉冲信号, 脉冲信号经过前级放大器和主放大器后经过信号甄别和 A/D 转换后发送给数据获取终端, 对数据进一步处理, 从而得到硼含量信息。

电子学线路由一套集成电路板构成, 如图 2。每块电路板能同时处理 3 路探测器的信号, 共有 4 块板子可以处理 12 路的信号, 每一路有将探测器的信号放大成形和过阈甄别功能, 高压模块可满足同时给 10 路探测器提供高压。采用该集成电子学系统, 避免了传统插件占用空间大、费用高等缺点。工控机与数据获取系统

收稿日期: 2023-03-15; 修改日期: 2023-07-17

作者简介: 苏晓斌(1980-), 女(满族), 辽宁辽阳人, 副研究员, 博士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: su\_bin\_2001@163.com

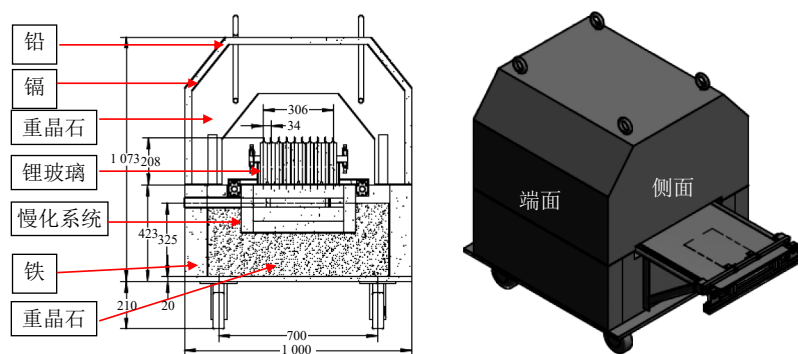


图 1 检测装置设计图[2]

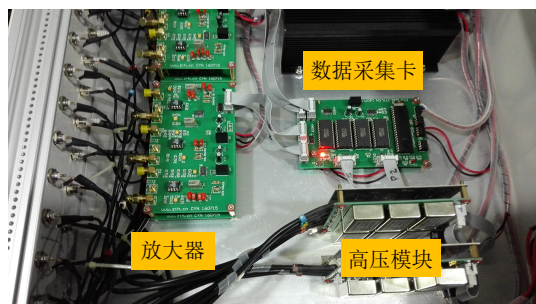


图 2 集成电子学模块

以 RS485 总线建立通信, 终端工控机软件对这些数据进行计数分析处理, 以图表的形式显示出来。

## 2.2 传动系统

传动装置是由传动平台、电机、丝杠螺杆、前后限位器、控制系统构成。传动平台上有硼铝板样品的固定横杆, 横杆两端与设备两侧丝杠螺杆相连, 电机带动丝杠转动, 从而带动硼铝板在检测平台上运动, 电机的控制系统与控制终端相连接, 电机的速度和运行工况可以通过软件进行设置。

传动系统的调速功能主要是通过变频器改变输给电动机的电压频率来控制电动机的转速, 从而控制皮带传动速度。测量时, 主控程序设定样品测量时的移动速度, 对应于变频器输出电压的频率, 然后变频器通过交流-直流-交流的形式将 50 Hz 交流电转变为设定频率的交流电带动电动机转动, 电动机带动皮带转动, 则样品会在此速度下经过测量系统进行测量。当挂片抵达测量终端时, 样板会触动限位器开关, 限位器发送给主控系统触发信号, 则主控系统发送命令给变频器停止命令, 使样品停止移动; 然后主控系统将已预先设定的速度控制样品退回原位置, 则可进行下一个样品的测量。

## 2.3 控制记录分析系统

工控机终端的功能主要有: 设置电机的工作状态参数从而控制电动传送装置的速度和分段测量工况; 数据获取系统实时完成数据的采集、处理, 可以直接监测中

子计数和穿透率数据; 软件可以通过高压模块设置和监测每一路探测器所加的电压。

检测设备终端控制系统实现了远程可视化控制功能, 其主要功能模块有电机控制系统、数据获取系统、高压控制模块, 如图 3。

图 4 为测量状态显示界面, 测量时可在“实时测量数据”一栏根据实际有效使用的探测器进行勾选。测量数据记录了每一路探测器分段测量的中子穿透率数值和中子计数率数值。

终端控制系统如图 5, 机柜中从上往下排放了三个机箱, 最上边是电机控制机箱, 中间位置是探测系统控

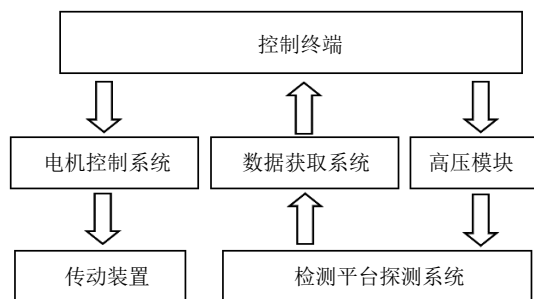


图 3 控制模块示意图



图 4 测量状态显示界面



图5 终端控制系统

制机箱，最下边放置的是工控机。终端工控机与控制模块之间的通信联系是通过工控机箱上PCI接口的数据卡建立的，该数据线分成两股分别连接电机控制系统机箱和探测系统控制机箱。探测系统由10个锂玻璃探测器组成，布局如图6所示，探测器从左至右编号为1-10。每个锂玻璃探测器有两个接口分别是：信号线接口S和高压线接口HV，10个探测器共有10路高压线和10路信号线接探测控制系统的机箱。

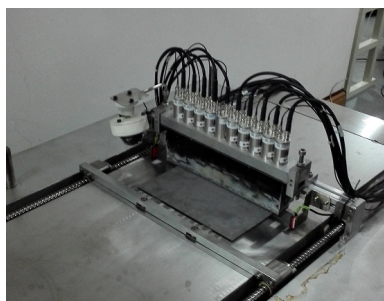


图6 锂玻璃探测阵列

为了实时监测样品在设备内部的行进情况，以防止样品在检测时遇到被卡住等突发状况，保护电机，同时为了调试设备时更精确地调节小尺寸样品的位置，我们在检测设备上屏蔽盖内部安装了摄像头。摄像头连接另一台监测用工控机，图7为一样品测量实时监测画面。



图7 样品监测装置

### 3 检测技术的应用

#### 3.1 整张B<sub>4</sub>C-Al样板的测量

用户提供了6块长373 cm、宽19.5 cm、厚0.35 cm的B<sub>4</sub>C-Al样品，如图8所示。我们先用标准板做标准曲线，然后将测定的中子透射率在标准曲线上内插求得<sup>10</sup>B面密度。由于样品太长，我们采用不锈钢和有机玻璃制作了延长支架，在支架头部安装一电动滚轮随电机转动，滚轮转动通过连接的胶带带动B<sub>4</sub>C-Al移动，结构如图9所示。之前实验都采用定点测量，本次实验采用移动式测量，使样品上尽可能多的点被测量到，样品行进速度为1.3 mm/s，分187个数据点测量。为保持样品行进方向不变，在延长支架上部样品两侧装有固定样板位置的卡子。因为整张B<sub>4</sub>C-Al板宽度比之前测量

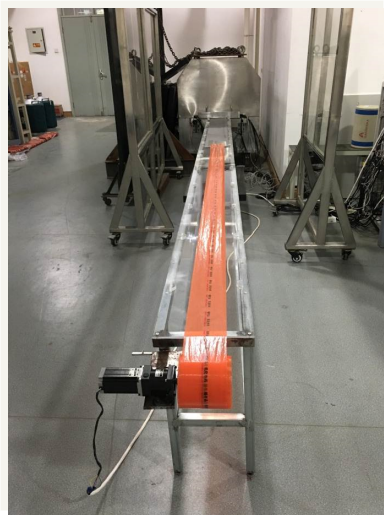
图8 整张乏燃料水池贮存格架用B<sub>4</sub>C-Al板

图9 改造后的检测设备

的悬挂样片宽度小<sup>[2]</sup>, 为了减小测量时产生的边缘效应, 对慢化后中子出射窗口进行了适当的改造。检测设备内部样板两侧也用含硼聚乙烯固定样板位置, 将中子出射窗口宽度减小到样板宽度, 同时可以屏蔽从侧面入射探测器的热中子, 减小了边缘效应。

### 3.1.1 标准板测量结果

用于制作标准曲线的标准板的<sup>10</sup>B面密度和中子透射率实验数据见表1。标准板为中国科学院金属研究所提供的3种硼含量(21%, 26%, 31%), 多个厚度(2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm)的B<sub>4</sub>C-Al标样, 为使其宽度与待测板相同, 将其裁成尺寸为32 cm × 19.5 cm的小块进行测量。由于10个中子探测器阵列的宽度大于19.5 cm, 造成只有中间五个探测器才能有效检测, 所以采用中间的5个探测器(ch3-ch7)的数据进行测量和分析, 每个标准板等间距测量10个数据点。因为B<sub>4</sub>C-Al板行进速度较慢, 刚开始测量时可能存在探测器被B<sub>4</sub>C-Al板部分挡住的情况, 这时的中子透射率数据是不准确的。为提高精度, 数据处理时标准板和待测样品中子透射率采用的数据都为去掉开始几个测量点后的数据的平均值。

表1 标准板的<sup>10</sup>B面密度及中子透射率数据

| 样品编号    | 密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 碳化硼含量 | <sup>10</sup> B面密度/<br>(g·cm <sup>-2</sup> ) | 中子透射率    |
|---------|------------------------------|-------|----------------------------------------------|----------|
| 21-2-1  | 2.656                        | 0.21  | 0.015 82                                     | 0.256 68 |
| 21-3-1  | 2.656                        | 0.21  | 0.023 99                                     | 0.217 26 |
| 21-5-1  | 2.656                        | 0.21  | 0.040 44                                     | 0.188 09 |
| 26-3-1  | 2.641                        | 0.26  | 0.030 01                                     | 0.203 40 |
| 26-4-1  | 2.641                        | 0.26  | 0.039 70                                     | 0.189 20 |
| 26-5-1  | 2.641                        | 0.26  | 0.049 66                                     | 0.178 37 |
| 31-3-31 | 2.635                        | 0.31  | 0.034 85                                     | 0.195 49 |
| 31-5-32 | 2.635                        | 0.31  | 0.059 37                                     | 0.172 48 |

图10为标准板测量数据拟合曲线, 曲线的拟合优度可达 $R^2=0.999\ 8$ , 系列公式为数据拟合函数,

$$T = 0.1499 \times \exp\left(-\frac{x}{0.02483}\right) + 2.18282 \times \exp(-x/0.00333) + 0.15857. \quad (1)$$

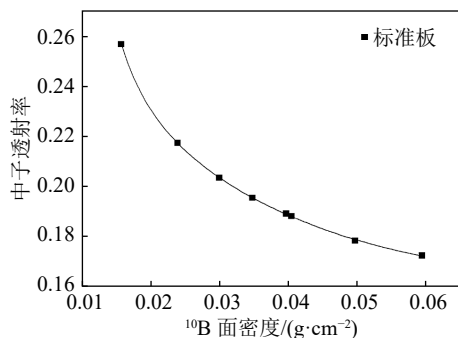


图10 标准板测量数据拟合曲线

### 3.1.2 待测板测量结果

待测量的6张样板用户没有提供给我们<sup>10</sup>B含量等详细信息, 无法直接计算出<sup>10</sup>B面密度, 需要将测得的中子透射率数据在标准曲线上内插得出<sup>10</sup>B面密度, 结果见表2。图11为检测终端显示的187个点的中子透射率数据, 从图中可见, 曲线平滑, 5路探测器测量数据点计数均匀, 说明样板的硼含量均匀。

表2 待测样板的<sup>10</sup>B面密度及中子透射率数据

| 待测板编号     | 中子透射率    | <sup>10</sup> B面密度/(g·cm <sup>-2</sup> ) |
|-----------|----------|------------------------------------------|
| 1700102-1 | 0.186 10 | 0.042 09                                 |
| 1700103-1 | 0.186 17 | 0.042 02                                 |
| 1700105-2 | 0.183 52 | 0.044 53                                 |
| 1700106-2 | 0.185 09 | 0.043 01                                 |
| 1700109-2 | 0.184 21 | 0.043 85                                 |
| 1700112-1 | 0.184 84 | 0.043 25                                 |

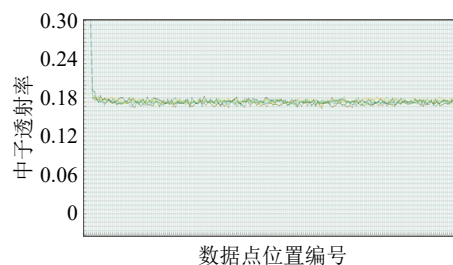


图11 中子透射率数据随位置的变化

### 3.1.3 不确定度和灵敏度分析

#### (一) 统计误差分析

表3中Ch3到Ch7显示了每张待测板测量时各路探测器的总计数统计误差, 整板总误差为各路探测器计数之和统计误差, 各点平均计数误差表示对每一个测量点的计数误差。对于整张样板来说, 总计数能达到 $6 \times 10^6$ , 统计误差在0.04%以下; 每个探测器测量的总计数约为 $1.2 \times 10^6$ , 统计误差在0.088%左右; 而对于每个测量点来说, 总计数在7 200个左右, 平均统计误差在1.18%左右; 没有样品时的本底计数为 $3.9 \times 10^4$ , 统计误差为0.5%。由此可以推算出各测量点穿透率相对标准误差约为1.28%。

#### (二) 拟合误差分析

表4为用标准板作拟合曲线的误差, 计算得到的不同碳化硼含量的标准板的<sup>10</sup>B面密度相对于拟合的标准曲线的残差相对值可以控制在1.2%以内, 结合统计误差总不确定度可控制在2.5%以内。从图10中拟合曲线可以看出, 当<sup>10</sup>B面密度变化1%时, 中子透射率变化范围在0.19%到0.56%之间, <sup>10</sup>B面密度越低的区域测量的灵敏度越高。

| 表 3 待测样板的测量统计误差 |          |          |          |          |          |          | 单位：%     |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 样板编号            | 待测样板     |          |          |          |          | 整板总误差    | 各点平均计数误差 |
|                 | Ch3      | Ch4      | Ch5      | Ch6      | Ch7      |          |          |
| 1700102-1       | 0.088 02 | 0.086 89 | 0.089 02 | 0.089 77 | 0.087 66 | 0.039 47 | 1.177 5  |
| 1700103-1       | 0.087 96 | 0.086 84 | 0.089 15 | 0.089 65 | 0.087 51 | 0.039 45 | 1.176 8  |
| 1700105-2       | 0.088 60 | 0.087 50 | 0.089 71 | 0.090 39 | 0.088 21 | 0.039 74 | 1.185 6  |
| 1700106-2       | 0.088 26 | 0.087 15 | 0.089 28 | 0.089 83 | 0.087 78 | 0.039 55 | 1.180 0  |
| 1700109-2       | 0.088 43 | 0.087 21 | 0.089 53 | 0.090 13 | 0.087 83 | 0.039 63 | 1.182 2  |
| 1700112-1       | 0.088 12 | 0.087 06 | 0.089 31 | 0.090 10 | 0.087 90 | 0.039 57 | 1.180 5  |

| 表 4 标准板拟合误差 |          |                           |           |
|-------------|----------|---------------------------|-----------|
| 编号          | 面密度      | 残差                        | 残差相对值/%   |
| 21-2-1      | 0.015 82 | -8.422 8×10 <sup>-7</sup> | -0.005 32 |
| 21-3-1      | 0.023 99 | 1.360 1×10 <sup>-5</sup>  | 0.056 72  |
| 21-5-1      | 0.040 44 | 8.062 8×10 <sup>-5</sup>  | 0.199 79  |
| 26-3-1      | 0.030 01 | -1.082 3×10 <sup>-4</sup> | -0.359 39 |
| 26-4-1      | 0.039 70 | 2.546 6×10 <sup>-4</sup>  | 0.645 65  |
| 26-5-1      | 0.049 66 | -6.016 3×10 <sup>-4</sup> | -1.197 00 |
| 31-3-31     | 0.034 85 | 1.576 5×10 <sup>-5</sup>  | 0.045 26  |
| 31-5-32     | 0.059 37 | 3.378 6×10 <sup>-4</sup>  | 0.572 36  |

### 3.2 小样品测量

#### 3.2.1 背景

在核电系统 AP1000 中，把 B<sub>4</sub>C<sub>2</sub>Al 复合材料作为乏燃料贮存水池的格架材料时<sup>[12]</sup>，为监测中子吸收材料的有效性，在乏池中通常会安放多个中子吸收材料监督样片，通过对监督样片的中子吸收能力、硼的均匀性和长期可靠性进行定期的检测，以保证中子吸收材料在使用过程中的有效性和安全性。监督样片材料均取自用于制造格架的相同批次材料，为 B<sub>4</sub>C<sub>2</sub>Al 材料。监督样片自下而上排列放置于贮存格架内，监督样片累积的中子注量都来源于它放置的贮存格架内的乏燃料组件。

为研究监督样片在乏燃料水池中的<sup>10</sup>B 消耗量，将与监督样片同种材料的方形样片放置于中国原子能科学研究院 49-2 泳池式反应堆热柱内进行辐照，热柱内热中子通量密度为 10<sup>11</sup> n·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 量级，辐照时间为 5 h。辐照样片是标称碳化硼含量为 20%、25%、31%、35% 的四种样品，每种含量的样品各 6 块，尺寸为 60 mm × 60 mm × 3 mm。

热柱的辐照对材料的<sup>10</sup>B 消耗较少，为了使材料的<sup>10</sup>B 产生较明显的消耗，同时在堆芯 H8 孔道对材料进行辐照，在堆芯孔道内辐照采用的样品为圆形的样片，碳化硼含量同样为 20%、25%、31%、35%、40%，每种含量各 3 块，尺寸为 Φ50 mm × 3 mm。H8 孔道中子通量密度较大，活性区中部的热中子通量密度是 2.658 8 × 10<sup>13</sup> n·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>，辐照时间为 9 d。

#### 3.2.2 测量方案

将辐照之前的样品与辐照之后的样品都进行了对比测量，包括 24 块方形样品和 15 块圆形样品。因为样品尺寸太小，无法使用传动装置直接送入检测口测量，因此特别制作了与标准板尺寸相同的模板，将待测小样嵌入模板进行测量。另外，只能采用一路探测器进行测量，为了保证样品能与探测器对齐，需要事先计算好模板位置。

模板是将已有的 B<sub>4</sub>C<sub>2</sub>Al 样板中间切割成与待测样板尺寸相符的方形孔与圆形孔，将样品嵌入到样板里进行测量，为了达到更好的统计，减小误差，采用分立元件测量。测量时采用定点测量，在传动装置的带动下首先方形样片到达探测器测量区域后手动暂停，对其进行测量，测量后再开启样品前进按钮，使圆形样片到达探测区域进行测量。B<sub>4</sub>C<sub>2</sub>Al 样板具体开孔位置需要多次测试进行标定。

如图 12 所示，模板的作用主要有两个方面：一是将样品送入确定位置与指定的探测器对准；二是屏蔽掉周围的散射中子，使样品测量过程中与标准样品条件尽量相同。将待测样品嵌入模板中由传送带送入检测设备中，其中方形样品采用图 6 中 5 号探测器测量，圆形样品采用 4 号探测器和 6 号探测器进行测量。

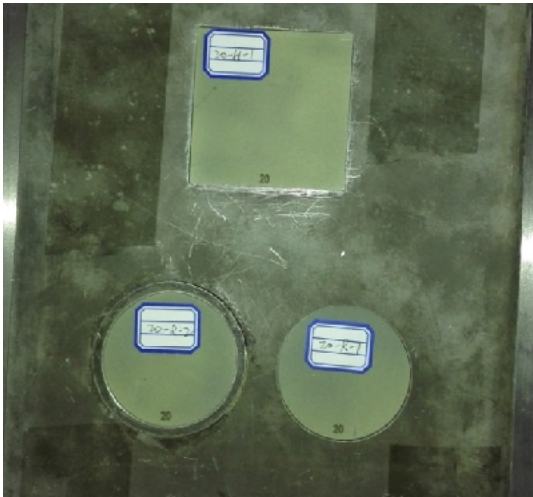


图 12 小样品测量模具

### 3.2.3 测量结果

将待测样板的透射率测量结果代入标准曲线拟合公式,可计算出待测样板的 $^{10}\text{B}$ 面密度。图 13 为入堆辐照前通过标准曲线内插计算的样品 $^{10}\text{B}$ 面密度值。图中红色点为待测板的数据点,面密度计算结果见表 5 中所列。

从实验结果可以看出,芯 H8 孔道辐照 $^{10}\text{B}$ 消耗比率要高于热柱内辐照。辐照后样品呈现了较强的 $\gamma$ 放射性,域上域下的计数率都比较高,造成死时间过大,可能造成一定的计数丢失。另外,反应堆的中子通量密度也存在一定误差范围。

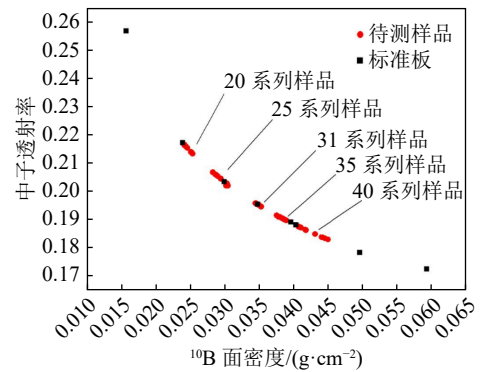


图 13 标准样板拟合曲线与辐照前待测样板内插数据

表 5 样品辐照前后 $^{10}\text{B}$ 面密度

| 辐照方式      | 待测板编号  | 入堆辐照前    |                                                       | 入堆辐照后    |                                                       | 辐照前后面密度差值  | 面密度变化的比例/% |
|-----------|--------|----------|-------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------|------------|------------|
|           |        | 中子透射率    | $^{10}\text{B}$ 面密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) | 中子透射率    | $^{10}\text{B}$ 面密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) |            |            |
| 热柱内辐照     | 20-H-1 | 0.215 91 | 0.024 473                                             | 0.218 16 | 0.023 663                                             | -0.000 811 | -3.31      |
|           | 20-H-2 | 0.215 82 | 0.024 508                                             | 0.217 36 | 0.023 945                                             | -0.000 563 | -2.30      |
|           | 20-H-3 | 0.215 34 | 0.024 690                                             | 0.217 79 | 0.023 793                                             | -0.000 897 | -3.64      |
|           | 20-H-4 | 0.216 10 | 0.024 383                                             | 0.217 11 | 0.024 036                                             | -0.000 347 | -1.42      |
|           | 20-H-5 | 0.216 40 | 0.024 266                                             | 0.217 50 | 0.023 895                                             | -0.000 371 | -1.53      |
|           | 20-H-6 | 0.216 50 | 0.024 255                                             | 0.217 45 | 0.023 913                                             | -0.000 342 | -1.41      |
|           | 25-H-1 | 0.206 70 | 0.028 390                                             | 0.208 09 | 0.027 767                                             | -0.000 623 | -2.19      |
|           | 25-H-2 | 0.205 90 | 0.028 819                                             | 0.206 40 | 0.028 576                                             | -0.000 243 | -0.84      |
|           | 25-H-3 | 0.205 70 | 0.028 919                                             | 0.207 84 | 0.027 883                                             | -0.001 036 | -3.58      |
|           | 25-H-4 | 0.206 00 | 0.028 769                                             | 0.207 10 | 0.028 236                                             | -0.000 533 | -1.85      |
|           | 25-H-5 | 0.205 33 | 0.029 110                                             | 0.205 59 | 0.028 979                                             | -0.000 131 | -0.45      |
|           | 25-H-6 | 0.204 46 | 0.029 557                                             | 0.205 16 | 0.029 196                                             | -0.000 361 | -1.22      |
|           | 31-H-1 | 0.195 62 | 0.034 749                                             | 0.196 52 | 0.034 162                                             | -0.000 586 | -1.69      |
|           | 31-H-2 | 0.195 60 | 0.034 761                                             | 0.196 46 | 0.034 196                                             | -0.000 565 | -1.63      |
|           | 31-H-3 | 0.195 78 | 0.034 642                                             | 0.196 92 | 0.033 903                                             | -0.000 739 | -2.13      |
|           | 31-H-4 | 0.195 55 | 0.034 793                                             | 0.196 74 | 0.034 017                                             | -0.000 776 | -2.23      |
|           | 31-H-5 | 0.195 45 | 0.034 860                                             | 0.196 84 | 0.033 953                                             | -0.000 907 | -2.60      |
|           | 31-H-6 | 0.195 15 | 0.035 058                                             | 0.196 32 | 0.034 292                                             | -0.000 766 | -2.18      |
|           | 35-H-1 | 0.190 43 | 0.038 469                                             | 0.191 89 | 0.037 364                                             | -0.001 104 | -2.87      |
|           | 35-H-2 | 0.189 70 | 0.039 043                                             | 0.190 54 | 0.038 383                                             | -0.000 659 | -1.69      |
|           | 35-H-3 | 0.190 71 | 0.038 253                                             | 0.191 71 | 0.037 496                                             | -0.000 757 | -1.98      |
|           | 35-H-4 | 0.190 01 | 0.038 797                                             | 0.190 73 | 0.038 240                                             | -0.000 557 | -1.44      |
|           | 35-H-5 | 0.189 89 | 0.038 891                                             | 0.191 25 | 0.037 843                                             | -0.001 048 | -2.70      |
|           | 35-H-6 | 0.190 89 | 0.038 116                                             | 0.191 67 | 0.037 524                                             | -0.000 592 | -1.55      |
| 堆芯H8孔道内辐照 | 20-R-1 | 0.213 90 | 0.025 232                                             | 0.227 50 | 0.022 430                                             | -0.002 802 | -11.11     |
|           | 20-R-2 | 0.213 76 | 0.025 304                                             | 0.225 95 | 0.022 910                                             | -0.002 394 | -9.46      |
|           | 20-R-3 | 0.213 30 | 0.025 463                                             | 0.226 73 | 0.022 666                                             | -0.002 797 | -10.98     |
|           | 25-R-1 | 0.202 00 | 0.030 571                                             | 0.214 43 | 0.027 271                                             | -0.003 300 | -10.79     |
|           | 25-R-2 | 0.202 80 | 0.030 428                                             | 0.215 78 | 0.026 682                                             | -0.003 745 | -12.31     |
|           | 25-R-3 | 0.202 00 | 0.030 300                                             | 0.216 32 | 0.026 455                                             | -0.003 845 | -12.69     |
|           | 31-R-1 | 0.195 50 | 0.034 775                                             | 0.208 23 | 0.030 271                                             | -0.004 504 | -12.95     |
|           | 31-R-2 | 0.195 80 | 0.034 570                                             | 0.208 32 | 0.030 227                                             | -0.004 343 | -12.56     |
|           | 31-R-3 | 0.194 60 | 0.035 390                                             | 0.208 87 | 0.029 939                                             | -0.005 451 | -15.40     |
|           | 35-R-1 | 0.191 00 | 0.037 893                                             | 0.204 01 | 0.032 616                                             | -0.005 277 | -13.93     |
|           | 35-R-2 | 0.191 50 | 0.037 651                                             | 0.205 40 | 0.031 816                                             | -0.005 835 | -15.50     |
|           | 35-R-3 | 0.191 48 | 0.037 660                                             | 0.205 11 | 0.031 978                                             | -0.005 682 | -15.09     |
|           | 40-R-1 | 0.182 96 | 0.045 084                                             | 0.196 91 | 0.037 232                                             | -0.007 852 | -17.42     |
|           | 40-R-2 | 0.183 80 | 0.044 169                                             | 0.196 74 | 0.037 358                                             | -0.006 811 | -15.42     |
|           | 40-R-3 | 0.183 40 | 0.044 589                                             | 0.196 77 | 0.037 333                                             | -0.007 256 | -16.27     |

3.2.4 不确定度分析

(一)统计误差分析

对样品入堆辐照前后测量时探测器计数的统计误差进行分析，结果见表6。

表 6 样品辐照前后计数统计误差

| 样品标号   | 入堆辐照前     |        | 入堆辐照后     |        |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|
|        | 总计数       | 统计误差/% | 总计数       | 统计误差/% |
| 20-H-1 | 855 303   | 0.11   | 837 512   | 0.11   |
| 20-H-2 | 854 932   | 0.11   | 834 165   | 0.11   |
| 20-H-3 | 853 020   | 0.11   | 836 089   | 0.11   |
| 20-H-4 | 856 262   | 0.11   | 821 781   | 0.11   |
| 20-H-5 | 857 509   | 0.11   | 834 863   | 0.11   |
| 20-H-6 | 857 628   | 0.11   | 834 693   | 0.11   |
| 25-H-1 | 819 108   | 0.11   | 791 369   | 0.11   |
| 25-H-2 | 815 670   | 0.11   | 784 970   | 0.11   |
| 25-H-3 | 814 880   | 0.11   | 790 445   | 0.11   |
| 25-H-4 | 816 064   | 0.11   | 2 177 564 | 0.07   |
| 25-H-5 | 813 366   | 0.11   | 2 161 664 | 0.07   |
| 25-H-6 | 809 921   | 0.11   | 2 157 154 | 0.07   |
| 31-H-1 | 2 152 576 | 0.07   | 743 839   | 0.12   |
| 31-H-2 | 774 823   | 0.11   | 743 642   | 0.12   |
| 31-H-3 | 775 557   | 0.11   | 745 363   | 0.12   |
| 31-H-4 | 2 151 831 | 0.07   | 744 690   | 0.12   |
| 31-H-5 | 2 150 665 | 0.07   | 745 071   | 0.12   |
| 31-H-6 | 773 061   | 0.11   | 743 079   | 0.12   |
| 35-H-1 | 754 343   | 0.12   | 726 317   | 0.12   |
| 35-H-2 | 751 448   | 0.12   | 721 223   | 0.12   |
| 35-H-3 | 755 448   | 0.12   | 725 645   | 0.12   |
| 35-H-4 | 752 679   | 0.12   | 721 926   | 0.12   |
| 35-H-5 | 752 206   | 0.12   | 723 898   | 0.12   |
| 35-H-6 | 756 156   | 0.11   | 725 504   | 0.12   |
| 20-R-1 | 832 596   | 0.11   | 863 250   | 0.11   |
| 20-R-2 | 831 891   | 0.11   | 854 528   | 0.11   |
| 20-R-3 | 830 355   | 0.11   | 857 712   | 0.11   |
| 25-R-1 | 788 266   | 0.11   | 813 246   | 0.11   |
| 25-R-2 | 789 292   | 0.11   | 820 653   | 0.11   |
| 25-R-3 | 789 775   | 0.11   | 822 568   | 0.11   |
| 31-R-1 | 761 115   | 0.11   | 788 530   | 0.11   |
| 31-R-2 | 762 320   | 0.11   | 789 171   | 0.11   |
| 31-R-3 | 757 556   | 0.11   | 793 669   | 0.11   |
| 35-R-1 | 743 995   | 0.12   | 772 711   | 0.11   |
| 35-R-2 | 745 249   | 0.12   | 783 452   | 0.11   |
| 35-R-3 | 745 164   | 0.12   | 781 400   | 0.11   |
| 40-R-1 | 712 024   | 0.12   | 749 582   | 0.12   |
| 40-R-2 | 1 987 763 | 0.07   | 748 301   | 0.12   |
| 40-R-3 | 713 939   | 0.12   | 747 251   | 0.12   |

探测器测量的有样品时总计数统计误差在 0.11% 左右，没有样品时的本底计数为  $1.1\times10^8$ ，统计误差为 0.03%。由此可以推算出穿透率相对标准误差约为 0.11% 左右。

(二)拟合误差分析

小样测量采用的标准曲线为图 10 中标准板测量数据拟合曲线，经计算其残差相对值可以控制在 1.2% 以内。

(三)系统误差分析

1) 测量位置引起的系统误差

由于样品在进入探测器灵敏区域前后存在位置变化带来的误差，根据测量单个样品的统计结果，位置变化带来的误差在 0.7% 以内，结合中子透射率的统计误差和拟合误差总的不确定度可控制在 2% 左右。

2) 圆形样品入堆后样品活化产生的γ本底引起的误差

辐照后的圆形样品在堆芯 H8 孔道中辐照时间较长，取出后已被活化，具有较强的γ放射性，出堆后圆形样品放置了一周后拿至检测设备上测量，20-R-1 样品γ本底计数率为  $6\,257\text{ s}^{-1}$ ，其中放射源产生的γ本底计数率为  $561\text{ s}^{-1}$ 。因为γ本底计数率太高，将样品放置 22 天后测量γ本底计数率为  $3\,355\text{ s}^{-1}$ 。样品本身带来的γ本底导致中子峰漂移，并且增加了甄别阈以上的中子峰计数率。图 14 中绿线的空心谱为圆形样品入堆照射前测量谱，实心谱形为照射后样品的测量谱。由于中子峰位漂移，需要对甄别域以上计数率进行修正，原来设置的甄别域位置为图 14 中绿色区域的起始位置，入堆辐照后对这部分计数的增加需要修正。对甄别域以上至辐照前后两个测量谱的交叠处增加的γ本底的计数进行分析(1010道-1099道)，经过计算，入堆照射后比入堆辐照前谱形上绿色区域面积增加计数 16 975 个，这部分计数对计数率贡献 1.96%，已经在测量结果中对此影响进行了修正。

通过扣除中子峰内明显增加的γ本底成份后，剩余中子峰内γ本底增加部分主要是γ峰堆积的影响，估算这部分占中子峰计数率的 0.5%,在测量结果中也对此影响进行了修正。

3.2.5 小结

1) 实验测量了 39 块待测样板入堆辐照前后的中子透射率，通过对标准曲线内插，计算出待测样板的平均  $^{10}\text{B}$  面密度。由图 13 所示的测量结果可以看到，碳化硼含量 40% 系列的待测样品  $^{10}\text{B}$  面密度分布比较发散，其余的几个系列  $^{10}\text{B}$  面密度分布比较集中。

待测样板分为入堆前和入堆后两种情况，分为两批测量，其中方形样品在 49-2 泳池式反应堆热柱内辐照，

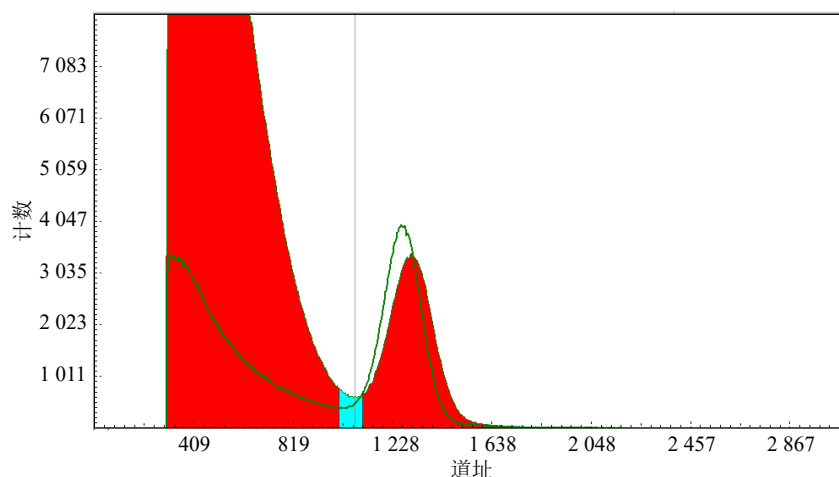


图 14 样品辐照前后脉冲幅度谱对比

热中子通量密度较小且辐照时间较短；圆形样品在堆芯 H8 孔道内辐照，热中子通量密度较大且辐照时间较长。从结果可以看出，入堆后的  $^{10}\text{B}$  面密度普遍比入堆前减小，辐照时间较短的方形样品面密度变化的比例在 0.45%~3.6% 之间；辐照时间较长的圆形样品面密度变化在 9.46%~17.42% 之间。

2) 辐照时间较短的方形样品测量数据误差，主要来源于测量中子透射率的统计误差和标准曲线的拟合误差以及样品前后测量位置的误差，中子透射率测量误差在 0.11% 左右，标准曲线拟合相对误差在 1.2% 以内，前后位置的不确定度引起的误差在 0.7% 以内，总误差在 2% 左右。

对于辐照时间较长的圆形样品，样品被活化后  $\gamma$  本底以及  $\gamma$  堆积对计数率影响在 2.46% 左右，如果样品放置较长时间后由于自身产生  $\gamma$  本底降低这部分影响会减小。

## 4 总结

中国原子能科学研究院研制的  $\text{B}_4\text{C}\text{-Al}$  材料中子吸收性能检测装置可应用于乏燃料贮存格架用硼铝复合材料中子吸收性能的检测。研究结果表明，该套检测设备可以应用于乏燃料水池格架的整张中子吸收材料和挂片的检测，也可用于小样品的测量，该检测设备检测结果可信度高，具有很好的实用价值与应用前景。

## 参考文献:

- [1] SU Xiaobin, HOU Long, WANG Qi, et al. *Nuclear Physics Review*, 2019, 36(4): 462. (in Chinese)  
(苏晓斌, 侯龙, 王琦, 等. *原子核物理评论*, 2019, 36(4): 462.)
- [2] SU Xiaobin, HOU Long, LIU Shilong, et al. *Nuclear Physics Review*, 2021, 38(3): 283. (in Chinese)  
(苏晓斌, 侯龙, 刘世龙, 等. *原子核物理评论*, 2021, 38(3): 283.)
- [3] SU Xiaobin, HOU Long, LIU Shilong, et al. *Nuclear Physics Review*, 2022, 39(2): 195. (in Chinese)  
(苏晓斌, 侯龙, 刘世龙, 等. *原子核物理评论*, 2022, 39(2): 195.)
- [4] ZHANG Kai. Development of Boron Steel Pipe Testing Equipment[D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2014. (in Chinese)  
(张凯. 硼钢管检测设备的研制[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2014.)
- [5] LU Xiting. *Nuclear Physics*[M]. Beijing: Atom Energy Press, 2001. (in Chinese)  
(卢希庭. *原子核物理*[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.)
- [6] VAN CAREL W E E. *Radiation Measurement*, 2004, 38(4/5/6): 337.
- [7] JI Changsong. *Neutron Detection Experiment Method*[M]. Beijing: Atom Energy Press, 1998. (in Chinese)  
(汲长松. *中子探测实验方法*[M]. 北京: 原子能出版社, 1998.)
- [8] JI Changsong. *Nuclear Techniques*, 1992, 15(2): 109. (in Chinese)  
(汲长松. *核技术*, 1992, 15(2): 109)
- [9] VAN CAREL W E E. *Nuc Instr and Meth A*, 2001, 460(1): 1.
- [10] ZHU Yongchang, GAO Sijian, OUYANG Shixi, et al. *Journal of Functional Materials*, 2009, 11(40): 1770. (in Chinese).  
(朱永昌, 高祀建, 欧阳世翕, 等. *功能材料*, 2009, 11(40): 1770.)
- [11] JI Changsong. *Nuclear Radiation Detector and Experimental Technology Manual*[M]. Beijing: Atom Energy Press, 1990. (in Chinese)  
(汲长松. *核辐射探测器及其实验技术手册*[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.)
- [12] TAN Gongli, LU Keke, SHI Libo. *Materials Review*, 2014, 28(24): 466. (in Chinese)  
(谭功理, 卢可可, 石立波. *材料导报*, 2014, 28(24): 466.)

## Upgrade and Application Research of Neutron Absorption Performance Testing Equipment for Boron Aluminum Alloy Materials

SU Xiaobin<sup>1)</sup>, HOU Long, LIU Shilong, YANG Yi, WANG Qi

(*Science and Technology on Nuclear Data Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

**Abstract:** The testing equipment for boron aluminum alloy neutron absorption materials in spent fuel pool grid of nuclear power plant developed by China Institute of Atomic Energy was upgraded and improved, and the integrated data acquisition system, transmission system and control record analysis system were developed. The detection equipment can be used for multi-point measurement of samples of different sizes. The detection device has the characteristics of continuous, fast, and full area detection, with two modes: fixed point detection and mobile detection. The 20 cm × 30 cm hanging sample, 373 cm × 19.5 cm long board, 6 cm × 6 cm square template and Φ5 cm × 0.3 cm circular sample plate have been tested and the detection results have been analyzed. The neutron absorption performance testing equipment for boron aluminum alloy materials lays the foundation for conducting non-destructive testing research on domestically produced boron containing neutron absorption materials, and provides strong support for critical safety monitoring of spent fuel pools in nuclear power plants.

**Key words:** boron aluminum alloy; neutron absorbing material; non-destructive testing

---

**Received date:** 15 Mar. 2023; **Revised date:** 17 Jul. 2023

**1)** SU Xiaobin, E-mail: [su\\_bin\\_2001@163.com](mailto:su_bin_2001@163.com)