****

**中华人民共和国国家计量技术规范**

**JJF XXXX-202X**

热中子探测器校准规范

Calibration Specification for Thermal Neutron Detectors

**（征求意见稿）**

202X-XX-XX发布 202X-XX-XX实施

**国家质量监督检验检疫总局 发 布**

热中子探测器校准规范

JJF 202X-XXXX

Calibration Specification for Thermal Neutron Detectors

归口单位：全国电离辐射计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

中国原子能科学研究院

本规范委托全国电离辐射计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

王平全（中国计量科学研究院）

张　辉（中国计量科学研究院）

刘毅娜（中国原子能科学研究院）

李　凡（中国计量科学研究院）

王志强（中国原子能科学研究院）

杨竣凯（中国计量科学研究院）

目 录

[1　范围 1](#_Toc148439952)

[2　引用文件 1](#_Toc148439953)

[3　术语和计量单位 1](#_Toc148439954)

[3.1　术语 1](#_Toc148439955)

[3.2　计量单位 5](#_Toc148439956)

[4　概述 5](#_Toc148439957)

[5　计量特性 5](#_Toc148439958)

[6　校准条件 5](#_Toc148439959)

[6.1　环境条件 5](#_Toc148439960)

[6.2　测量标准及其它设备 5](#_Toc148439961)

[7　校准项目和校准方法 6](#_Toc148439962)

[7.1　校准项目 6](#_Toc148439963)

[7.2　校准方法 6](#_Toc148439964)

[8　校准结果表达 9](#_Toc148439965)

[9　复校时间间隔 10](#_Toc148439966)

[附录A　热中子探测器中子注量响应校准修正因子 11](#_Toc148439967)

[附录B　热中子探测器校准不确定度评定示例 13](#_Toc148439968)

[附录C　热中子探测器校准配套电子学设备 22](#_Toc148439969)

[附录D　热中子探测器校准原始记录推荐格式 24](#_Toc148439970)

[附录E　热中子探测器校准证书内页格式 26](#_Toc148439971)

引 言

本规范依据JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编制。

本规范编制主要参考了JJF 1001-1998《通用计量术语及定义》、ISO 8529-1《中子参考辐射　第1部分：辐射特性和产生方法》（Neutron reference radiations fields – Part 1: Characteristics and methods of production）和GB/T 7164-2022　《用于核反应堆的辐射探测器特性及测试方法》等技术法规、标准。

本规范为首次发布。

热中子探测器校准规范

# 1　范围

本规范适用于热中子探测器的校准，热中子探测器包括气体探测器、半导体探测器、闪烁体探测器等。

# 2　引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1001—2011　通用计量术语及定义

JJF 1035—2006　电离辐射计量术语及定义

JJF 1059.1—2012　测量不确定度评定与表示

GB/T 4960.1-2010　核科学技术术语　第1部分：核物理与核化学

GB/T 4960.6-2008　核科学技术术语　第6部分：核仪器仪表

GB/T 7164-2022　用于核反应堆的辐射探测器特性及测试方法

EJ/T 676—92　中子正比计数管

ISO 8529-1　中子参考辐射场　第1部分：辐射特性和产生方法（Neutron reference radiations fields – Part 1: Characteristics and methods of production）

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

# 3　术语和计量单位

## 3.1　术语

JJF 1001—2011、JJF 1035—2006、GB/T 4960.1—2010、GB/T 4960.6—2008和IEC 60050-395界定的及以下术语和定义适用于本规范。

### 3.1.1　热中子　thermal neutron

与周围介质处于热平衡状态的中子。

注：麦克斯韦能量分布下，293.6 K时最概然能量等于0.0253 eV。

### 3.1.2　镉截止　cadmium cutoff

　镉阈值　cadmium threshold

动能低于此能量的中子会被镉吸收，高于此能量的中子会穿过镉（镉对中子是透明的）。在核计量学中，该值通常设定为0.5 eV。

### 3.1.3　参考辐射　reference radiation

为校准辐射测量仪表以及确定其能量响应而规定的一系列具有不同能量不同发射率和其他特征的辐射。

### 3.1.4　参考位置　reference position

参考点　reference point

校准位置　calibration position

辐射场中约定真值已知的点。

### 3.1.5　中子注量　neutron fluence

*Φ*

d*N*除以d*a*而得到的商，即：



式中：

d*N*——入射到截面积为d*a*的球体中的中子数。

注：中子注量的单位为m−2，常用单位为cm−2。

### 3.1.6　中子注量率　neutron fluence rate

　中子通量密度　neutron flux density

*φ*

d*Φ*除以d*t*而得到的商，即：



式中：

d*Φ*——中子注量在时间间隔d*t*内的增量。

注：中子注量率的单位为m−2·s−1，常用单位为cm−2·s−1。

### 3.1.7　谱中子注量　spectral neutron fluence

中子注量的能量分布　energy distribution of the neutron fluence

*ΦE*

d*Φ*除以d*E*而得到的商，即：



式中：

d*Φ*——中子注量在能量间隔*E* ~ *E*+d*E*内的增量。

注：谱中子注量的单位为m−2·J−1，常用单位为cm−2·eV−1。

### 3.1.8　谱中子注量率　spectral neutron fluence rate

　谱中子通量密度　spectral neutron flux density

*φE*

d*ΦE*除以d*t*而得到的商，即：



式中：

d*ΦE*——谱中子注量在时间间隔d*t*内的增量。

注：谱中子注量率的单位为m−2·s−1·J−1，常用单位为cm−2·s−1·eV−1。

### 3.1.9　热中子注量率　thermal neutron fluence rate

　热中子通量密度　thermal neutron flux density

*φE*(thermal)

谱中子注量率*φE*在热中子能区的积分，在计量学中，热中子为镉截止能量以下的中子。



注：热中子注量率的单位为m−2·s−1，常用单位为cm−2·s−1。

### 3.1.10　中子能谱　neutron energy spectrum

　中子能量分布　neutron energy distribution

中子注量率或中子密度随能量的分布。

### 3.1.11　3He正比计数器　3He proportional counter

充有3He气体，用于探测中子的正比计数管，起始电离是由中子与3He进行核反应产生的质子和氚核引起的。

### 3.1.12　BF3正比计数器　BF3 proportional counter

　BF3计数管　BF3 counter tube

充有BF3气体，用于探测中子的正比计数管，起始电离是由中子与10B进行核反应产生的*α*粒子和锂核引起的。

### 3.1.13　涂硼计数管　boron lined counter tube

在其内壁或适当形状的电极上涂有10B衬里，用于探测热中子的计数管。起始电离是由中子与10B进行核反应产生的*α*粒子和锂核引起的。

### 3.1.14　裂变电离室　fission ionization chamber

内壁涂有裂变材料、用于探测中子的电离室。起始电离主要是由中子与裂变物质进行核反应产生的裂变碎片引发的。根据可裂变物质放射性核素的不同，可以探测包括热中子、快中子在内的所有能量中子。

### 3.1.15　涂硼半导体探测器　boron coated semiconductor detector

表面含有10B涂层，用于探测热中子的半导体探测器。起始电离是由中子与涂层中10B进行核反应产生的*α*粒子和锂核引起的。

### 3.1.16　锂闪烁探测器　lithium scintillation detector

含有6Li，用于探测热中子的闪烁探测器，初始电离是由中子与6Li进行核反应产生的*α*粒子和氚核引起的。

注：常见的锂闪烁体有锂玻璃、LiI(Eu)和LiBaF3等。

### 3.1.17　载硼ZnS(Ag)闪烁探测器　ZnS(Ag) scintillation detector

含有10B，用于探测热中子的ZnS(Ag)闪烁探测器。起始电离是由中子与涂层中10B进行核反应产生的*α*粒子和锂核引起的。

### 3.1.18　探测器参考点　reference point of detector

探测器上用于将其定位于参考点的实际或虚拟的标志。该标志通常是探测器的几何中心或有效中心。

### 3.1.19　反散射　back-scattering

粒子或辐射被物质散射时，相对于它们入射方向的角度大于90°的散射。

### 3.1.20　扰动　perturbation

当在有限空间内进行校准时，由于探测器内部的自吸收会减少反散射中子，从而改变参考位置的中子注量水平。

### 3.1.21　中子注量响应　neutron fluence response

*RΦ*

在特定条件下，仪器的读数除以中子注量（率）约定量值得到的商：



式中：

*M*——在某个中子注量（率）下，经散射、线性、几何等效应修正后的探测器计数（率）。

*Φ*——试验点处中子注量（率）约定量值，cm−2 (cm−2·s−1)。

### 3.1.22　中子注量参考响应　neutron fluence reference response

*RΦ*

在参考条件下，仪器的读数除以中子注量（率）约定量值得到的商。

本规范中，参考条件是能量为0.0253 eV的单向平行入射中子束。

### 3.1.23　校准因子　calibration factor

中子注量响应的倒数。

### 3.1.24　探测器死时间　detector dead time

核辐射探测器记录一个计数脉冲后到再能记录一个新脉冲所需的最短时间间隔。

### 3.1.25　（计数管的）坪　plateau (of a counter tube)

计数管特性曲线上计数率基本上不随所加电压变化的那一部分。

### 3.1.26　壁效应　wall effect

探测器壁对测量结果的影响。它通常与探测器壁的性质和厚度有关。

### 3.1.27　角响应　angle response

探测器的响应与中子入射角的关系。

## 3.2　计量单位

### 3.2.1　中子注量：每平方厘米；符号：cm−2。

### 3.2.2　中子注量率：每平方厘米每秒；符号：cm−2·s−1。

### 3.2.3　注量响应：平方厘米；符号：cm2。

### 3.2.4　本规范所用到的其他量均采用国际单位制（SI）单位。

此外，还可使用下列单位：

能量：电子伏特（eV），1 eV = 1.602×10−19 J；

# 4　概述

热中子探测器是一种用来探测热中子的传感器，是中子测量中最常用的探测器类型，广泛用于核能、国防、医学、环保、资源开发和科学研究等中子物理涉及的各个方面。探测器通常为中子正比计数器（3He计数器、10BF3计数器、涂硼计数器）、裂变电离室、涂硼电离室、闪烁探测器（6Li玻璃闪烁探测器、含10B ZnS (Ag)闪烁探测器）和半导体探测器（涂硼半导体探测器、6LiF夹心半导体探测器）等。入射中子与热中子探测器灵敏体积内的靶原子核发生相互作用（核反冲、核反应、核裂变和核活化）产生带电粒子或γ光子，进而产生可测量的电信号，由电子学系统进行分析和记录，实现对热中子的探测。

# 5　计量特性

5.1　坪特性曲线

坪长≥50V，坪斜≤1%/100V。

5.2　热中子注量响应

标准试验条件下，热中子探测器的热中子注量响为0.001 cm2 ~ 100 cm2。

注：以上指标不适用于合格性判别，仅供参考。

# 6　校准条件

## 6.1　环境条件

### 6.1.1　环境温度：(20±5)℃，测量过程中环境温度变化不超过2℃。

### 6.1.2　环境相对湿度：(25%～75%)RH。

### 6.1.2　环境气压：86 kPa～106 kPa。

### 6.1.3　交流电源：(220±22)V，(50±5)Hz。

### 6.1.4　其他条件：周围无影响仪器正常校准工作的电磁干扰和机械振动。

## 6.2　测量标准及其它设备

校准用设备应经过计量技术机构校准合格，并在有效期内。

### 6.2.1　热中子参考辐射装置

稳定的热中子参考辐射场可以通过慢化放射性核素中子源或加速器中子源发射的中子来产生，也可以通过反应堆热柱孔道直接引出，参考位置的热中子注量率应保证：

1）校准脉冲探测器时，由热中子贡献的计数率不小于10 s−1；

2）校准电流型电离室时，由热中子贡献的电流不小于10−11 A；

3）使用热中子参考辐射装置进行热中子探测器校准时，应保证其辐射区域完全覆盖探测器的灵敏区，且热中子参考辐射装置的热中子注量率应溯源至热中子注量率基准。

### 6.2.2　配套设备

适当的具有放大、整形、甄别和计数等功能的电子学仪器。校准所使用的设备应在有效量程及有效期限内使用，保证校准结果的溯源性。对于暂无国家标准、行业标准的设备或专用配套设备，为确保校准结果的可信度，宜通过已经校准或检定的信号源进行比对合格后才能使用。

连接器和电缆是探测器不可分割的一部分，其相关特性应不影响探测器的性能。

直尺：测量范围：0~1000 mm；分辨率≤1 mm。

温湿度计：温度测量范围：0℃~60℃；分辨率≤0.1℃；湿度测量范围：0%RH~99%RH；分辨率≤2.0%RH。

# 7　校准项目和校准方法

## 7.1　校准项目

热中子探测器的校准项目见表2。

表2　热中子探测器校准项目一览表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 校准项目 | 校准方法条款 |
| 1 | 外观及工作正常性检查 | 7.2.1 |
| 2 | 坪特性曲线 | 7.2.2 |
| 3 | 热中子注量响应 | 7.2.3 |
| 注：  1 本表校准项目中，“外观及工作正常性检查”和“热中子注量响应”为强制性校准项目；  2 如果热中子探测器的出厂说明书中规定了探测器的推荐工作电压，“坪特性曲线”可以不做。 | | |

## 7.2　校准方法

### 7.2.1　外观及工作正常性检查

被校准仪器应具有生产厂家、规格型号和出厂编号等标识，其外部宜有用于校准目的的参考点标志。被校准仪器外观不应有锈蚀、裂纹和破损等影响正常工作的损伤。输入输出接口应牢固。连接校准设备，通电后探测器应正常工作。

### 7.2.2　坪特性曲线

坪特性曲线的校准步骤如下：

a）校准时，将被校探测器按参考方向放置于热中子参考辐射场中，并使探测器参考点位于辐射场参考位置。探测器参考点和参考方向宜由制造商给出。在没有探测器参考点或参考方向信息情况下，这些参数应由校准实验室确定，并在校准证书中说明；

b）按照图1连接校准仪器，设置合适的放大倍数，不施加工作电压，预热15 min；

c）调节幅度甄别器（单道）的甄别电压，直至计数率小于1 s−1，此电压是甄别噪声的阈值；

d）调节甄别电压使其至少大于1.1倍阈值；

f）从小到大改变探测器的工作电压；

g）记录不同工作电压下测量设备/系统输出计数率（计数率较高时，工作在脉冲模式下的裂变电离室可测试其均方电压）；

h）绘制得到探测器的坪特性曲线，示意图如图2。

图示

描述已自动生成

图1　气体探测器脉冲模式校准连线示意图

图示

描述已自动生成

图2　脉冲探测器坪特性曲线示意图

探测器坪特性曲线的坪斜计算如公式（7）：



式中：

*P*m,S —— 坪斜，单位为每100伏的百分数（%/100 V）；

*U*m,1 —— 低电压，单位为伏（V）；

*U*m,2 —— 高电压，单位为伏（V）；

*N*m,1 —— 在低电压*U*m,1下测得的计数率，计数率单位为每秒（s−1）；

*N*m,2 —— 在高电压*U*m,2下测得的计数率，计数率单位为每秒（s−1）。

当某工作电压*U*m,3～*U*m,4区间的坪斜小于要求值时，坪长可由公式（8）得出：



式中：

*U*m,L —— 坪长，单位为伏（V）；

*U*m,4 —— 坪末端电压，单位为伏（V）；

*U*m,3 —— 坪始端电压，单位为伏（V）。

推荐工作电压由公式（9）得出：



式中：

*U*m,R —— 推荐工作电压，单位为伏（V）；

### 7.2.3　热中子注量响应

热中子探测器的热中子注量响应不应与热中子参考辐射场有关，应在预先约定的参考条件下进行评估。本规范中，参考条件为能量为0.0253 eV的单向平行入射中子束。

当热中子参考辐射装置测量位置的镉上中子对响应校准结果的不确定度贡献不可忽略时，采用镉差法测量中子注量响应，即在探测器外部包裹1 mm镉套，以扣除镉上中子在探测器中产生的计数。根据裸探测器和包镉探测器的计数测量结果，结合必要的修正获得参考条件下的热中子探测器的注量响应。

中子注量响应的校准步骤如下：

a）将被校探测器按参考方向放置于热中子参考辐射场中，并使探测器参考点与辐射场参考位置重合。探测器参考点和参考方向宜由制造商给出。在没有探测器参考点或参考方向信息情况下，这些参数应由校准实验室确定，并在校准证书中说明；

b）按照图1连接校准仪器，在合适的放大倍数情况下，施加推荐工作电压，预热15 min；

c）设置合适的甄别阈，尽可能扣除电子学噪声和γ本底的贡献，启动测量并记录裸探测器中子累积计数，测量时间的设置应使得探测器的计数统计好于1%；

d）在被校探测器外部包裹1 mm镉套，确保探测器灵敏区域无直射热中子进入，按照图1连接校准仪器，设置合适的甄别阈尽可能扣除电子学噪声和γ本底，启动测量并记录包镉探测器的镉上中子累积计数，测量时间的设置应使得探测器的计数统计好于1%；

在参考条件下，中子注量响应*R*ref可以按照下式进行计算：



式中：

*R*local —— 实际中子辐射场中的热中子探测器注量响应；

*k*spec —— 中子能谱差异修正，见附录A；

*k*dir —— 热中子角度分布差异修正，见附录A；



式中：

*n* —— 实际中子辐射场中能量在镉阈以下的中子造成的探测器计数率；

 —— 实际中子辐射场中能量在镉阈以下的热中子注量率；



式中：

*N* —— 热中子探测器的计数；

*N*Cd —— 包有1 mm厚镉片的探测器的计数；

*t* —— 热中子探测器的测量时间；

*t*Cd —— 包有1 mm厚镉片的探测器的测量时间；

 —— 热中子探测器计数死时间修正，见附录A；

 —— 包有1 mm厚镉片的探测器计数死时间修正，见附录A；

*k*Cd —— 镉对截止能量以上中子的衰减修正，见附录A；



式中：

 —— 金箔活化法确定的热中子注量率；

 —— 热中子探测器扰动修正，见附录A；

 —— 热中子注量分布不均匀性修正，见附录A；

# 8　校准结果表达

热中子探测器校准后，出具校准证书。校准证书应至少包括以下信息：

a) 标题：“校准证书”；

b) 实验室名称和地址；

c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；

d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；

e) 客户的名称和地址；

f) 被校对象的描述和明确标识；

g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；

h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；

i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；

j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；

k) 校准环境的描述；

l) 校准结果及其测量不确定度的说明；

m) 对校准规范的偏离的说明；

n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；

o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；

p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

# 9　复校时间间隔

复校时间间隔建议为12个月。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录A

热中子探测器中子注量响应校准修正因子

A.1　死时间修正 *k*DT

探测器计数的死时间修正为：





式中：

*τ* —— 非扩展死时间；

*N* —— 热中子探测器的计数；

*n* —— 热中子探测器的计数率；

A.2　中子能谱差异修正 *k*spec

实际中子辐射场的能量分布可能会偏离具有中子参考温度*kT*= 25.3 meV的麦克斯韦能量分布，必须进行修正，以获得本规范规定的参考条件下的热中子响应。能量分布差异的修正因子*k*spec由下式给出：





式中：

*φ*(*E*)/*φ* —— 实际中子辐射场能量分布的相对能谱注量；

*φ* —— 实际中子辐射场的热中子注量；

*R*(*E*) —— 热中子探测器的对不同能量中子的响应；

*R*(*E*0) —— 热中子探测器对能量为0.0253 eV的中子的响应；

A.3　热中子角度分布差异修正 *k*dir

如果用于校准热中子探测器的辐射场不是单向的，同时热中子探测器响应存在各向异性，则需要修正热中子注量的角分布的影响。



式中：

*R*Parallel —— 平行中子束下的热中子探测器注量响应；

*R*local ——实际中子辐射场角分布下的热中子探测器注量响应；

A.4　热中子注量分布不均匀性修正 *k*Δ

热中子注量分布不均匀性修正由计数器灵敏区域上的不均匀注量分布引入。这种影响可以通过使用扫描程序进行实验修正，也可以使用蒙特卡罗方法计算。

A.5　扰动修正*k*λ

在有限空间进行校准时，将校准探测器放入辐射场的行为可能会引起扰动，由于探测器的自屏蔽效应，导致探测器位置的有效热中子注量率水平发生变化。辐射场内参考位置处的热中子注量率可能会包括一些由于被腔壁材料反射而多次通过探测位置的中子注量率，当探测器放入时，这部分中子注量率会减少。因此必须对这种自屏蔽效应进行修正，扰动修正*k*λ可使用蒙特卡罗方法计算。

附录B

热中子探测器校准不确定度评定示例

B.1　概述

依据本校准规范的各项计量特性、校准条件与校准项目的规定，对热中子探测器进行校准。热中子探测器的主要参数有坪特性曲线和中子注量响应。本附录给出了中子注量响应测量不确定度的评定示例，坪特性曲线用探测器测量数据的统计误差表征，无需给出测量不确定度。

B.2　热中子注量响应的不确定度评定

B.2.1　测量模型

基于放射性核素中子源的热中子参考辐射装置校准热中子探测器。本规范规定参考条件为能量为0.0253 eV的单向平行入射中子束。参考条件下，热中子注量响应可表示为：



式中：

 —— 实际中子辐射场中的热中子探测器注量响应；

 —— 中子能谱差异修正；

 —— 中子角度分布修正；



式中：

 —— 实际中子辐射场中能量在镉阈以下的中子造成的探测器计数率；

 —— 实际中子辐射场中能量在镉阈以下的热中子注量率；



式中：

 —— 热中子探测器的计数；

 —— 包有1 mm厚镉片的探测器的计数；

 —— 热中子探测器的测量时间；

 —— 包有1 mm厚镉片的探测器的测量时间；

 —— 热中子探测器计数死时间修正；

 —— 包有1 mm厚镉片的探测器计数死时间修正；

 —— 镉对截止能量以上中子的衰减修正；



式中：

 —— 金箔活化法确定的热中子注量率；

 —— 放射性核素中子源衰变修正；

 —— 热中子探测器扰动修正；

 —— 热中子注量分布不均匀性修正；

联立式（B.1）、（B.2）、（B.3）和（B.4）可得：



根据以上分析可知，参考条件下热中子探测器热中子注量响应的不确定度来源有：探测器计数引入的不确定度、包镉探测器计数引入的不确定度、探测器测量时间引入的不确定度、包镉探测器测量时间引入的不确定度、热中子注量率引入的不确定度、修正因子、、、、、、、等引入的不确定度。

A.2.2　输入量标准不确定度的评定

B.2.2.1　探测器计数的标准不确定度评定

探测器计数的标准不确定度来源主要是热中子探测器计数的统计误差。按照图1连接热中子探测器与相关电子学设备，并放置于热中子参考辐射场的参考位置处进行连续测量，测量时间为600 s，总计数为3926872。

放射性测量的计数值服从正态分布，单次测量的统计误差可表示为：



即由统计误差引入的标准不确定度：



B.2.2.2　包镉探测器计数的标准不确定度评定

包镉探测器计数的标准不确定度来源主要是热中子探测器计数的统计误差。按照图1连接热中子探测器和相关电子学设备，放置于热中子参考辐射场参考位置处进行连续测量，测量时间1800 s，总计数460837。

放射性测量的计数值服从正态分布，单次测量的统计误差为：



即由统计误差引入的标准不确定度：



B.2.2.3　探测器测量时间的标准不确定度评定

热中子探测器测量的标准不确定度主要由时间分辨率引入，时间分辨率为1 s，按均匀分布，取，则标准不确定度为：



B.2.2.4　包镉探测器测量时间的标准不确定度评定

包镉热中子探测器测量的标准不确定度主要由时间分辨率引入，时间分辨率为1 s，按均匀分布，取，则标准不确定度为：



B.2.2.5　热中子注量率的标准不确定度评定

热中子参考辐射装置参考位置处的热中子注量率：2000 cm−2·s−1，*U*rel=5.0% (*k*=2)。标准不确定度为：



B.2.2.6　修正因子的标准不确定度评定

修正因子通常采用蒙特卡洛方法计算，不确定度分量主要是计算结果的统计涨落。



修正因子的标准不确定度为：



B.2.2.7　修正因子的标准不确定度评定

探测器计数率*n*为：



根据误差传递公式，探测器计数率*n*的标准不确定度为：



探测器系统的非扩展死时间*τ*= 7.2 μs，标准不确定度= 0.9 μs，依据式（14）、（15），可以得到探测器计数的死时间修正为：



根据误差传递公式，探测器计数率*n*的标准不确定度为：



B.2.2.8　修正因子的标准不确定度评定

包镉探测器计数率为：



根据误差传递公式，探测器计数率*n*的标准不确定度为：



探测器系统的非扩展死时间*τ*= (7.2 ± 0.9) μs，标准不确定度，依据式（14）、（15），可以得到探测器计数的死时间修正为：



根据误差传递公式，探测器计数率*n*的标准不确定度为：



B.2.2.9　修正因子的标准不确定度评定

修正因子通常采用蒙特卡洛方法计算，不确定度分量主要是计算结果的统计涨落。



修正因子的标准不确定度为：



B.2.2.10　修正因子的标准不确定度评定

修正因子通常采用蒙特卡洛方法计算，不确定度分量主要是计算结果的统计涨落。



修正因子的标准不确定度为：



B.2.2.11　半衰期修正因子的标准不确定度评定

对于基于放射性核素中子源的热中子参考辐射装置，参考位置的热中子注量率依据放射性核素衰变公式进行修正，修正因子为：



式中：

 —— 金箔活化法确定的热中子注量率，参考日期2022年10月10日；

 —— 当前日期的热中子注量率，当前日期为2023年10月10日；

 —— 241Am的衰变常量，，半衰期= 432.6年；

 —— 衰变时间；

经计算：



241Am的半衰期为432.6年，修正因子的标准不确定度：



B.2.2.12　修正因子的标准不确定度评定

修正因子通常采用蒙特卡洛方法计算，不确定度分量主要是计算结果的统计涨落。



修正因子的标准不确定度为：



B.2.2.13　修正因子的标准不确定度评定

修正因子通常采用蒙特卡洛方法计算，不确定度分量主要是计算结果的统计涨落。



修正因子的标准不确定度为：



B.2.4　合成标准不确定度

依照公式：



由于、、、、、、、、、、、、之间不相关，由式（A.6）得到：



其中：

、、、、、、、、、、、、分别为、、、、、、、、、、、、对的灵敏系数。

B.2.4.1　灵敏系数

对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



对的灵敏系数：



B.2.4.2　标准不确定度汇总表

热中子探测器中子注量响应的标准不确定度汇总见表A.1。

表A.1 标准不确定度汇总表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 *u*(*xi*) | 不确定度来源 *xi* | 不确定度 量值 | 灵敏系数 *ci* | 不确定度分量|*ci|·ui* |
|  | 探测器计数 | 1981.63 | 1.031×10−6 | 0.002043 |
|  | 包镉探测器计数 | 678.85 | −3.398×10−7 | 0.0002307 |
|  | 探测器测量时间 | 0.29 | −0.006748 | 0.001957 |
|  | 包镉探测器测量时间 | 0.29 | 8.698×10−5 | 2.522×10−5 |
|  | 热中子注量率 | 50 | −0.001946 | 0.0973 |
|  | 镉对截止能量以上中子的衰减修正因子 | 0.013 | −0.1512 | 0.001966 |
|  | 探测器计数死时间修正因子 | 6.18×10−3 | 3.8596 | 0.02385 |
|  | 包镉探测器计数死时间修正因子 | 2.31×10−4 | −0.1563 | 3.611×10−5 |
|  | 中子能谱差异修正因子 | 0.010 | 3.4292 | 0.03429 |
|  | 中子角度分布修正因子 | 0.015 | 3.7605 | 0.05641 |
|  | 放射性核素中子源衰变修正因子 | 0.000 | −3.900 | 0 |
|  | 热中子探测器扰动修正因子 | 0.015 | −3.9078 | 0.05862 |
|  | 热中子注量分布不均匀性修正 | 0.001 | −3.8844 | 0.003884 |

以上各输入量标准不确定度分量互相独立不相关，合成标准不确定度可按下式得到：



代入后得到：



相对合成标准不确定度为：



B.2.5　扩展不确定度计算

取包含因子*k*= 2，得到相对扩展不确定度：



热中子探测器中子注量响应的扩展不确定度为：



附录C

热中子探测器校准配套电子学设备

热中子探测器校准配套电子学设备见表C.1。

表C.1　热中子探测器校准配套电子学设备及其要求

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 仪器设备名称 | 要求 |
| 1 | 电压灵敏前置放大器 | 合适的放大倍数；  放大倍数8 h稳定性好于±0.1%；  积分非线性（外接负载1 kΩ，输出幅度为0.5 V时）：不大于0.5%；上升时间小于0.3 μs；  输入阻抗不小于500 kΩ。 |
| 2 | 电荷灵敏前置放大器 | 合适的电荷灵敏度；  上升时间不大于30 ns；  最大线性幅度输出：+2 V。 |
| 3 | 电流灵敏前置放大器 | 合适的转换系数；  上升时间不大于50 ns； |
| 4 | 脉冲线性放大器 | 放大倍数可调；  成形后，脉冲上升时间应小于待测探测器脉冲收集时间。  积分非线性（输出脉冲幅度在0.1～10 V范围内）：不大于0.1%；  微分、积分时间常数分档可调；  连续工作8h放大倍数变化不大于0.3%。 |
| 5 | 高压电源 | 输出电压调节范围：0~3 kV连续可调；  输出电压稳定性：8 h内优于±0.1%；  输出极性：正或负；  噪声与纹波（峰-峰）：不大于20 mV。 |
| 6 | 低压电源 | 为前置放大器，主放大器和脉冲幅度分析器提供低压。 |
| 7 | 幅度甄别器 （单道） | 甄别电压可调范围：0.1 V~2 V；  甄别电压准确度：不大于1%。 |
| 8 | 脉冲幅度分析器 （多道） | 道数M：不小于512道；  积分非线性：不大于1%。 |
| 9 | 定标器 | 分辨时间：不大于0.3 μs；  计数率上限：不小于2 MHz；  准确度：不大于0.1% |
| 10 | 示波器 | 实时采样率：不小于1 GS/s；  垂直分辨率：不小于5 mV。 |
| 11 | 微电流表 | 测量范围：1×10−12 A~1×10−2 A；  准确度：不大于5%。 |

附录D

热中子探测器校准原始记录推荐格式

D.1　基本信息

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 原始记录编号 |  | 委托单编号 | |  |
| 证书/报告编号 |  | | | |
| 送校日期 | 年 月 日 | 完校日期 | | 年 月 日 |
| 单位名称 |  | | | |
| 器件名称 |  | 型号规格 | |  |
| 出厂编号 |  | 生产厂家 | |  |
| 客户地址 |  | | | |
| 联系人 |  | 联系方式 | |  |
| 计量器具名称 |  | 扩展不确定度 （*k* = 2） | |  |
| 计量器具证书号 |  | 有效期至 | | 年 月 日 |
| 依据技术文件 |  | | | |
| 实验室校准环境 | 温度：　　℃ | | 湿度：　　%RH | |
| 校准人员 |  | 核验人员 | |  |
| 测量地点 |  | 校准日期 | | 年 月 日 |

D.2　配套附件

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 仪器设备名称 | 型号 | 编号 | 备注 |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

第1页 共2页

D.3　热中子探测器校准数据记录

D.3.1　外观及工作正常性检查 是否测量：是□ / 否□

|  |  |
| --- | --- |
| 检查项目 | 记录 |
| 是否有影响工作的机械损伤 |  |
| 各项标识是否清晰完整 |  |
| 输入输山接口是否牢靠 |  |
| 仪器通电后状态是否正常 |  |

D.3.2　坪特性曲线 是否测量：是□ / 否□

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 工作电压, V | 计数率, s−1 | 工作电压, V | 计数率, s−1 |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

D.3.3　中子注量响应 是否测量：是□ / 否□

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 名称 | | 数值 | 扩展不确定度（*k* = 2） |
| 参考位置 | |  | |
| 热中子注量率, cm−2·s−1 | |  |  |
| 测量 （未包镉） | 测量总计数 |  |  |
| 测量时间, s |  |  |
| 死时间修正*k*1 |  |  |
| 测量 （包镉） | 测量总计数 |  |  |
| 测量时间, s |  |  |
| 死时间修正*k*1 |  |  |
| 注量分布不均匀性修正*k*2 | |  |  |
| 中子能谱差异修正*k*3 | |  |  |
| 角分布修正*k*4 | |  |  |
| 扰动修正*k*5 | |  |  |
| 中子注量响应（测试条件） | |  |  |
| 中子注量响应（参考条件） | |  |  |

第2页 共2页

附录E

热中子探测器校准证书内页格式

E.1　外观及工作正常性检查

|  |  |
| --- | --- |
| 检查项目 | 记录 |
| 是否有影响工作的机械损伤 |  |
| 各项标识是否清晰完整 |  |
| 输入输山接口是否牢靠 |  |
| 仪器通电后状态是否正常 |  |

E.2　坪特性曲线

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 工作电压, V | 计数率, s−1 | 工作电压, V | 计数率, s−1 |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

E.3　中子注量响应

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 名称 | | 数值 | 扩展不确定度（*k* = 2） |
| 参考位置 | |  | |
| 热中子注量率, cm−2·s−1 | |  |  |
| 测量 （未包镉） | 测量总计数 |  |  |
| 测量时间, s |  |  |
| 死时间修正*k*1 |  |  |
| 测量 （包镉） | 测量总计数 |  |  |
| 测量时间, s |  |  |
| 死时间修正*k*1 |  |  |
| 注量分布不均匀性修正*k*2 | |  |  |
| 中子能谱差异修正*k*3 | |  |  |
| 角分布修正*k*4 | |  |  |
| 扰动修正*k*5 | |  |  |
| 中子注量响应（测试条件） | |  |  |
| 中子注量响应（参考条件） | |  |  |