

无损检测技术在核工业中的应用 论文集

编者 刘兰华 刘南陔

原子能出版社

前 言

本论文集介绍了有关核燃料元件和核材料的无损检测技术,其中包括射线检测、超声检测、涡流检测和声发射检测技术等。这些无损检测方法在我国核燃料元件和核材料生产中曾经成功地使用过,或者还在使用中,它们对保证产品质量起着重要作用。这些技术不但对核工业很有实用价值,而且在普通工业中也可以应用。

这些论文是长期从事核燃料元件和核材料无损检测技术研究工作的许多同志所获得的重要科研成果。我们组织出版这本论文集的主要目的是介绍几十年来原核工业部在多种核燃料元件和核材料的生产中,依靠自力更生所建立的各种无损检测方法和所研制的各种仪器。这些技术可为从事核燃料元件和核材料无损检测工作者利用和借鉴,有利于学术交流。我们相信这本论文集将成为我国核燃料元件和核材料无损检测技术的有用的参考资料。

论文集的出版自始至终是在原核工业部张沛霖总工程师的支持和指导下完成的。曾得到核燃料局李骞、甄树权同志和部情报所高绣雯同志的支持和帮助。同时得到核动力研究设计院孙玉发、张宗唐同志和核工业第五研究设计院张钦志同志的支持和帮助。稿件的审阅、校对得到北京中国科学院王梦瑞、王贻仁同志,北京大学卢希庭同志,国家标准出版社李天吴等同志的大力协助,使出版工作得以顺利进行。

以上许多同志为论文集的问世做出了宝贵的贡献。在此,我们对广大撰稿人和支持我们的所有朋友们的辛劳和贡献表示由衷的感谢。

刘兰华 刘南陔

1998. 9

目 录

γ -吸收法非破坏测定 $UAlx-Al$ 弥散型燃料板中铀的均匀度	王昭月 黄久然 谢永怀 蒋国珍 (1)
检测板型元件铀均匀性的等效标准板	王昭月 蒋国珍 左明复 (6)
U_3Si_2-Al 板型燃料元件表面铀污染量的检测及其数据处理系统	李淑兰 何凤歧 穆晓春 王庆恒 韩景泉 苏宝恒 (12)
板型核燃料元件芯体定位技术的研究	张立晨 (17)
软 γ 射线透视图象系统研制	何凤歧 邢传辉 (25)
采用 X 射线层析摄影和图象处理技术测定 HTGR 燃料元件 UO_2 分布均匀性	张立晨 (30)
压水堆燃料棒焊缝 X 射线照相检查方法	卢安生 (37)
秦山核电站燃料元件 ^{235}U 丰度无损检查仪	刘南陔 刘兰华 (50)
提高核电站元件 ^{235}U 同位素丰度检查的速度和精确度	刘兰华 刘南陔 邓景珊 周呈方 李佐昌 刘筠 潘兴华 (56)
大亚湾核电站燃料元件 ^{235}U 丰度无损检查仪	刘南陔 刘兰华 邓景珊 周呈方 李佐昌 刘筠 潘兴华 (67)
计算机在 ^{235}U 丰度无损检查仪中的应用	刘筠 邓景珊 (75)
元件 ^{235}U 丰度检查放射性衰变干扰的校正方法研究	刘兰华 刘南陔 邓景珊 周呈方 刘筠 (81)
核电站燃料元件 UO_2 芯块间隙无损检查仪	刘南陔 刘兰华 邓景珊 罗敏轩 刘筠 (92)
动力堆燃料元件棒表面铀沾污的无损检查方法	刘南陔 刘兰华 (100)
核电站燃料元件 UO_2 芯块 ^{235}U 丰度无损分析方法	刘南陔 刘兰华 王德明 (105)
高纯锗半导体探测器检查 UO_2 芯块的 ^{235}U 同位素丰度	刘兰华 刘南陔 邓景珊 (109)
BGO(锗酸铋)晶体用于 UO_2 芯块中 ^{235}U 的 γ 射线的测量	刘南陔 刘兰华 (117)
^{252}Cf 中子活化 UO_2 芯块提高 γ 射线强度	刘兰华 刘南陔 邓景珊 周呈方 (122)
^{252}Cf 中子活化核燃料元件棒在线检查 ^{235}U 同位素丰度方法研究	邓景珊 周呈方 罗敏轩 刘兰华 刘南陔 (129)

无源 γ 射线能谱法测量材料试验堆元件的芯体厚度	刘兰华 毛建民	(134)
^{241}Am γ 射线吸收法测量 MTR 燃料元件的芯体厚度	刘兰华 毛建民	(145)
铀铝合金上铝包壳厚度的测量	刘兰华	(158)
^{137}Cs γ 射线吸收法检查弥散型元件芯棒密度的均匀性	刘兰华	(164)
板型燃料元件结合质量超声自动检测系统		
..... 唐月明 于兵 万志坚 张立晨 李书良 穆晓春 刘莉		(171)
低浓铀元件结合层质量的超声相位和幅度的鉴别技术	何凤歧	(176)
爆炸焊接质量宽频超声无损检测原理	何凤歧	(183)
影响核燃料元件包壳管超声检测可靠性的因素	王文之	(189)
影响核用国产冷作不锈钢管探伤合格率的因素研究	王文之	(195)
THC— I 型涂层测厚仪的研制	张志毅 李菊苗 周海波 沈玉忠	(200)
燃料元件包壳厚度测量的自动判别系统的研制	周海波 许旭东 张志毅	(204)
燃料组件外形尺寸形位误差检测系统及软件	龚玮 何凤歧 苑群启 王健红 万志坚	(210)
应用超导磁强计技术无损检测核燃料元件原理分析	何凤歧 李欣	(215)
受载 UO_2 微球声发射特性的研究	张立晨	(222)
声发射技术监测奥氏体不锈钢在焊接过程中的质量	张立晨	(227)
用声发射技术监测模拟压力管道的破裂	张立晨 孙长城 冯英群	(239)
低浓铀元件镀镍和残留镍的磁法无损检测	何凤歧 逯忠信	(246)
板形燃料元件无损检测新技术	何凤歧	(252)
利用电子传感器自动计量燃料组件尺寸形位公差	何凤歧	(257)
荧光检漏技术— 聚变装置真空内衬的检漏 —	朱毓坤 严东海 房开金 龚晓东	(263)

γ —吸收法非破坏测定 UAl_x-Al 弥散型燃料板中铀的均匀度

王昭月 黄久然 谢永怀 蒋国珍

(核动力研究设计院)

摘 要

本文介绍了评价 UAl_x-Al 弥散型燃料板铀均匀性的一种非破坏测量方法— γ 吸收法。利用 20 毫居里的 ^{241}Am 放射源、单道 γ 谱仪、平衡记录仪和电气传动装置组成测量系统；借助于化学分析方法标定参考样品，并对其结果进行最小二乘法拟合获得工作曲线；通过对被测燃料板轴向 γ 扫描的定标输出数据的数值积分，求得该燃料板的平均铀密度。方法的静态测量精密度好于 1%，与化学分析法比较相对偏差 $<1\%$ 。

一、前言

在反应堆板型燃料元件的研制和生产过程中，定量测定燃料板中铀的均匀度和绝对量，无论从对工艺产品的评价，提供堆物理和热工计算数据来说，还是用于确定燃料元件在堆中的使用效果都具有重要意义。X 光照像虽能直观地给出铀的分布图象，但不能获得精确的定量结果。近年来国外一些工作^[1]，都采用 X 或 γ 射线吸收法以及自发 γ 射线测量等技术来评价铀的均匀性，然而迄今为止还未见到精确的数据处理方法。我们采用 γ 吸收法，设计了相应的装置和测试程序。在数据处理上利用最小二乘法拟合工作曲线，用数值积分法计算铀的平均密度，从而提高了方法的精密度。用本法对我所研制的不同含铀量和不同轧制工艺的 UAl_x-Al 弥散型燃料板进行了均匀性评价，获得了满意的结果。

二、基本原则

当一窄束 γ 射线通过物质层时，遵从指数吸收规律：

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1)$$

式中 I_0, I 分别为射线束通过吸收体前、后的辐射强度(计数/秒)； d 为物质层的质量厚度(克/厘米²)； μ 为吸收物质的质量吸收系数(厘米²/克)。对 UAl_x-Al 弥散型燃料板，其吸收系数为

$$\mu = \mu_u \cdot U\% + \mu_{Al} \cdot Al\% \quad (2)$$

式中 μ_u, μ_{Al} 分别为铀和铝的质量吸收系数； $U\%, Al\%$ 为铀、铝的百分含量。

将(2)式代入(1)式并经简单运算得到

$$C_u = \frac{1}{\mu_u - \mu_{Al}} \ln I_0/I - \frac{\mu_{Al} d}{\mu_u - \mu_{Al}} \quad (3)$$

式中 C_u 为燃料板中铀的面密度(克/厘米²)。由(3)式可见只要 $\mu_u \gg \mu_{Al}$ ，铀的面密度和 $\ln I_0/I$ 具有简单的线性关系

$$C_u = K \ln I_0/I + b \quad (4)$$

$$K = \frac{1}{\mu_u - \mu_{Al}} \quad b = \frac{-\mu_{Al}d}{\mu_u - \mu_{Al}}$$

事实上对于 60 千电子伏特的 γ 射线, $\mu_u = 6.82$ 厘米²/克, $\mu_{Al} = 0.279$ 厘米/克, 上面的条件是满足的。式中的斜率 K 和截距 b 通过测量一系列已知铀密度的参考样品求得。对于未知铀密度的燃料板, 只要在相同的工作条件下测量出该燃料板的透射强度 I 后便可由 (4) 式计算出铀密度。

三、实验装置

本法的实验装置由下列几部分组成(图 1):

- (1) ^{241}Am γ 放射源及其准直装置。源强 20 毫居里, 准直孔径 4×30 。
- (2) 电气传动装置。扫描测量时被测燃料板在该装置上作匀速移动。
- (3) 闪烁 γ 探头。它由 GDB44 光电倍增管和 $\Phi 40 \times 1$ 毫米的 NaI(Tl) 晶体组成。
- (4) 单道脉冲幅度分析器。
- (5) 高压电源。
- (6) 自动定标器。
- (7) 线性计数率表。
- (8) x-y 平衡记录仪。

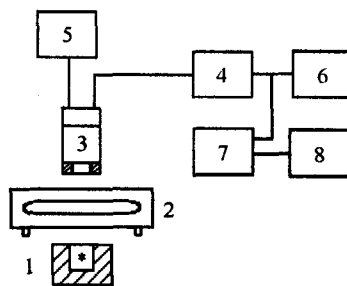


图 1 实验装置

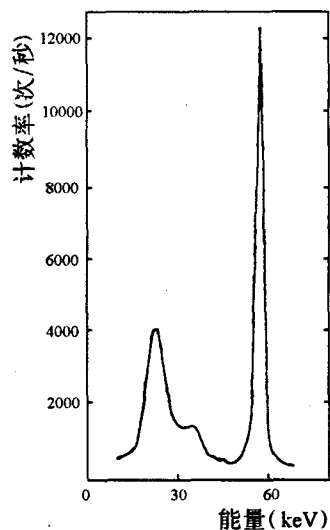


图 2 ^{241}Am γ 射线能谱

四、实验方法

4.1 装置工作条件确定

利用上述测量装置实测 ^{241}Am 的 γ 能谱如图 2 所示。为了获得较高计数率 I_0 和提高计数稳定性, 根据谱形特征, 我们选取单道分析器的甄别水平为 8.8 伏, 道宽 1.0 伏。高压 700 伏, 扫描速度 9.08 毫米/分, 记录仪纸速 10 毫米/分, 积分时间常数 1 秒, 计数时间 10 秒。

4.2 参考样品的制备与测量

在 7 种铀含量不同的元件板上选取边长为 1 厘米且铀含量比较均匀的小方块, 再将其划分四等分, 让准直孔对准每部分的中心, 再测量该点的透射强度。每部分测量 5 次, 取其平均值。最后取下这块样品并用化学分析方法测定其中的铀总量, 其结果如表 1 所示。

表 1 参考样品测量结果

样品	10-1	9-9	4-4	9-7	9-16	10-2	9-6
I/I_0	0.3610	0.4099	0.6469	0.5063	0.4530	0.6069	0.5634
铀密度 (毫克/厘米 ²)	120.80	104.61	49.60	77.24	93.69	54.87	66.83

为获得铀密度与透射强度之间的函数关系,对表 1 的数据利用最小二乘法拟合得

$$C_u = 123.2 \ln I_0/I - 4.961 \text{ (毫克/厘米}^2\text{)} \quad (5)$$

线性相关系数是 0.9991,可见铀密度与 $\ln I_0/I$ 之间几乎是完全的线性关系。

4.3 影响因素的考虑

(1) 漏计数的修正

测量系统具有一定的分辨时间,如果探头相继输出的两个脉冲的间隔时间小于分辨时间,后一脉冲就可能被漏记。在我们的工作中最高计数率可达 20000 次/秒,当系统分辨时间为 1 微秒时,则会产生 2% 的计数误差,此时应进行如下修正

$$n_0 = \frac{n}{1 - n\tau}$$

式中 τ 为单道 γ 谱仪的分辨时间, n 为仪器测得的计数强度, n_0 为经修正后的真实强度。

(2) 铝的影响

燃料板中含有大量的铝,对于我们所测试的各种含量级别的燃料板,经取样分析表明,当铝的面密度在 275.0—313.4 毫克/厘米² 内变化时,由于铝的质量吸收系数很小,在这个范围内所引起的透射强度的对数变化小于 0.1%。因此对于各种不同含量的燃料板,铝的影响可以作为常数来处理,它已包含在截距 b 中。

(3) 天然本底和铀的自发辐射的影响

探测器除了记录透过燃料板的 γ 辐射外,还记录了少部分天然本底和燃料板本身 γ 辐射。经实测和计算,这部分计数仅占透射强度的 0.1% 左右,可以忽略不计。

4.4 燃料板平均铀密度的计算

一块芯体长度为 L 的非均匀燃料板,其轴向的平均铀密度应通过下面积分计算(图 3):

$$\bar{C}_u = \frac{1}{L} \int_0^L C_u(x) dx \quad (6)$$

利用(5)式并考虑漏计数修正后

$$\bar{C}_u = 123.2 \ln I_0 - \frac{123.2}{L} \int_0^L \ln I(x) dx - 2.346 - K$$

式中 K 为透射强度 I 的漏计数修正项。

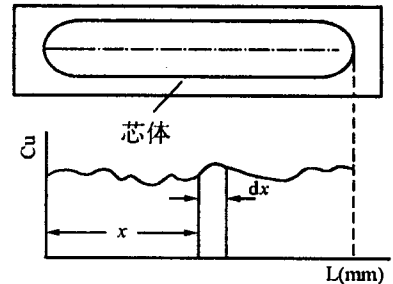


图 3 平均铀密度计算示意图

上式中的积分采用梯形数值积分法计算。为了消除直接从扫描曲线上查找 $I(x)$ 值所带来的误差,在扫描测量的同时,利用自动定标器进行同步计数,每隔 20 秒获取一个数据,所以数值积分步长 $h = \text{扫描速度} \times 20 \approx 3$ 毫米。根据梯形积分法

$$\int_0^L \ln I(x) dx = \frac{h}{2} [\ln I_0 + 2(\ln I_1 + \ln I_2 + \dots + \ln I_n) - \ln I_n]$$

燃料板中铀密度的最大值和最小值分别通过该燃料板透射强度的最小和最大值并利用(5)式计算得到。

五、结果与讨论

5.1 准确度和精确度

为考察本法的准确度和精确度,我们分别在 7-5 和 4-3 号燃料板上选取了边长为 1 厘米的小方块,用和测试参考样品相同的方法对其进行再现性测量,然后取样进行化学分析,其结果如表 2 所示。数据表明本法结果同化学分析结果比较其相对偏差 $< 1\%$, 相对标准偏差也小于 1% , 准确度和精确度都是令人满意的。

表 2 准确度和精密度

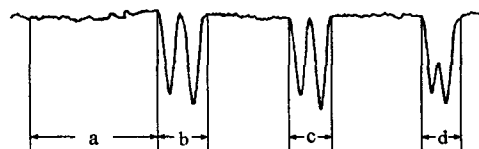
单位: 毫克铀/厘米²

样品号	1	2	3	4	5	平均	相对标准偏差	化学分析结果	理化偏差
7-5	56.32	56.82	56.41	56.37	56.33	56.45	0.37%	56.24	0.37%
4-3	84.15	83.95	83.87	83.97	83.67	83.92	0.49%	84.53	0.72%

附图 1 是不同时间测得的同一块燃料板的扫描曲线。两曲线在细节上都是相同的,说明本法也具有良好的动态重现性。

5.2 测量装置的几何分辨能力

为研究本装置的几何分辨性能(即分辨两相邻的铀浓集点的能力),我们将两条宽度为 3 毫米的 UAlx-Al 细条垂直地放置在一块比较均匀的燃料板的轴线上,改变两细条之间的距离,观察扫描曲线上两吸收峰的变化情况(图 4)。当两细条相距 3 和 5 毫米时,两峰还能完全分开,而当两细条相距 2 毫米时出现了两峰部分重叠现象,但仍能分辨。所以本装置可以把燃料板上距离为 2 毫米,宽度为 3 毫米的两个相邻的铀浓集点完全得以分辨。

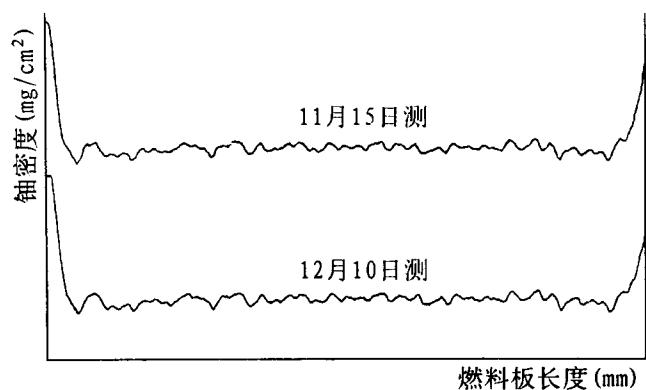


- a 未放 UAlx-Al 细条;
- b 两细条相距 5 毫米;
- c 相距 3 毫米;
- d 相距 2 毫米

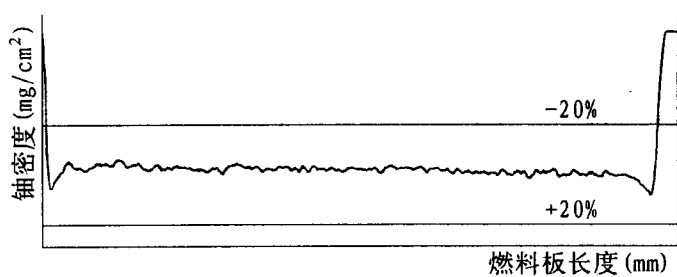
图 4 两吸收峰的变化情况

5.3 样品检测结果

我们利用 γ 吸收法对 15 块不同铀含量和不同轧制工艺的 UAlx-Al 弥散型燃料板进行了均匀性评价。对每块燃料板给出了铀向扫描曲线,并在曲线上标出了偏离于平均值 20% 的界线,如附图 2 所示。同时还计算了各燃料板中铀密度的极大值、极小值和平均值以及波动范围。所检测的这些燃料板的均匀性都达到了设计要求。同时,利用本装置还能清楚地观察出“狗骨”和“猫尾”现象。



附图 1 不同时间所测的铀密度的扫描曲线



附图 2 燃料板铀密度的扫描曲线

我们用 γ 吸收法对 $UAlx-Al$ 弥散型燃料板进行了铀的均匀性评价,既获得了铀的直观分布图象,又得到了精确的定量结果。实验证明利用本法检测燃料板的均匀度具有成本低,精密度高,直观性强和不破坏样品等特点。本法不仅适用于 $UAlx-Al$ 弥散型燃料板,原则上也适用于质量吸收系数远小于 μ_0 的其它板型燃料元件的铀均匀性评价。

参考文献

- [1] P.DE MEESTER, Proc. 6th. Int. Conf. on. nondestructive Testing, P45-57.

检测板型元件铀均匀性的等效标准板

王昭月 蒋国珍 左明复

(中国核动力研究设计院)

摘要

为解决弥散型燃料板铀均匀性检测中标准燃料板的制作和刻度的难题,用 LT24 铝研制了一套等效标准板。本文以 U_3Si_2-Al 燃料板为例,介绍等效标准板的研制方法和应用效果。

关键词 γ 吸收 铀均匀性 等效标准板

前言

目前,检测弥散型燃料板铀分布均匀性大多采用低能 γ (或 X)射线吸收法^{[1][2]}。该法是一种非破坏性的相对测量方法,需要一组已知铀面密度的标准燃料板,以供比较。然而标准板的制作决非易事,其根本原因在于工艺上难以准确地控制铀的面密度。且刻度困难。采用等效标准板^[3]可解决这一难题。

我们知道,无论是燃料板或是其它介质都能吸收 γ 射线使其强度减弱。反之,根据 γ 射线衰减的情况无从判别是哪种介质所引起,可能是燃料板,也可能是其它材料所引起。所以,在射线被吸收减弱这一点上,可以用一组适当厚度的其它材料的实心板来代替不同铀面密度的弥散型燃料板,使前者对 γ 射线的吸收量分别等于相应铀面密度的燃料板的吸收量,称作等效标准板。在使用上,它和带燃料芯体的真实标准板不仅完全等效,而且更加方便。

一、等效标准板的选材

等效标准板的材料应根据被测燃料板对射线的吸收程度和测量装置中探头与源准直器之间的距离来确定。材料对射线的吸收量取决于它的质量吸收系数 μ 和质量厚度之积。对于一定类型的被测燃料板,如所选标准板材料的 μ 值和密度过大,则标准板厚度加工公差将会引起等效铀面密度更大的刻度误差。反之,则会增大板厚,探头与源准直器之间的距离难以容纳。所以选材时须根据材料的 μ 值和密度进行综合考虑。计算表明,对于以铝为基体的燃料板,宜用铝合金材料,如 LT24 铝材。这种材料的 μ 值和密度较小,易于控制等效铀面密度的精度,而且具有较高的强度和较好的耐腐蚀能力,用它制作的标准板,其厚度一般不会超过 3cm,不影响放置。对于以锆为基体的燃料板,因锆的质量吸收系数和密度都远大于铝,须选用吸收系数大的材料制作标准板,如不锈钢较为适宜。

二、等效标准板的刻度

制作一套符合要求的等效标准板的关键是精确地进行等效铀面密度刻度。当材料选定后,标准板的等效铀面密度取决于板厚。所以首先须从实验中找出燃料板的铀面密度和与其

等效吸收的 LT24 铝板厚度之间的函数关系。为此须在 γ 吸收装置上分别测出燃料板和 LT24 铝对 ^{241}Am 的 60keV γ 射线的吸收特性曲线。为保证精度,上述两曲线均用最小二乘法拟合成解析的表达式。

1. 燃料板吸收特性曲线测定

数学推导表明,燃料板上某点的铀面密度 $D_u(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 和射线通过该点的强度 I (计数/秒)之间有下列关系:

$$D_u = K \ln I + A \tag{1}$$

式中斜率 K 和截距 A 通过下列步骤求得:

首先制作一套铀面密度不等的参考样片。除铀面密度外,其它所有技术条件和制作工艺均和 $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ 燃料板相同。第二,利用 γ 吸收扫描,在各参考样片上寻找铀分布比较均匀的区域,然后在该区内任选一点,测量该点的透射强度 I 。第三,在测点处取出直径和准直孔径相同的圆片样,并精确地测量其面积。第四,用 ISO 标准化学分析方法测定圆片样品的铀总量。第五,根据测得的铀总量和取样面积计算铀面密度。

上述测量结果如表 1 所示。以 $\ln I$ 为自变量, D_u 为因变量进行线性拟合,确定(1)式中的 K 和 A 。

$$D_u = -157.9 \ln I + 1383.5 \tag{2}$$

拟合优度 $r = 0.9977$,表明燃料板的铀面密度 D_u 和 $\ln I$ 之间有很好的线性关系。

表 1 参考样片测量结果

参考样号	铀面密度(mg/cm^2)	透射强度(计数/秒)	透射强度对数
1	96.7	3538	8.17
2	129.6	2764	7.92
3	148.4	2545	7.84
4	159.7	2280	7.73
5	198.6	1754	7.47
6	214.1	1613	7.39
7	237.6	1445	7.28
8	249.6	1340	7.20

2. LT24 铝吸收特性曲线测定

铝对射线的吸收特性是由吸收曲线反映的。在探头和源准直器间逐次放入不同厚度的 LT24 铝片,其厚度预先用卡尺精确测定。每改变一次厚度测一次透射强度,结果见表 2。

表 2 LT24 铝吸收曲线测量结果

序号	铝片(mm)	透射强度(计数/秒)	透射强度对数
1	4.9	5012	8.52
2	10.5	3402	8.13
3	12.5	2936	7.98
4	14.4	2595	7.86
5	16.5	2223	7.71
6	18.5	1913	7.56
7	20.4	1697	7.44

铝对射线的吸收服从指数规律,吸收层厚度 T 和 $\ln I$ 之间也应是线性关系。由表 2 数据拟合回归方程:

$$T = -14.3 \ln I + 126.7 \quad (3)$$

拟合优度 $r = 0.9999$, 线性十分令人满意。

3. 等效标准板的刻度

由(2)、(3)式不难得到燃料板的铀面密度 D_u 和与其等效吸收的铝板厚度 $T(\text{mm})$ 之间的函数关系

$$D_u = 11.04T - 15.45 \quad (4)$$

(4)式称作刻度方程。知道标准板的厚度 T 后,便可由它计算出等效铀面密度。

在标准板的设计中,一般是将它的等效铀面密度事先设定为三个特定值:燃料板铀面密度名义值分别为 D_u^0 ; $1.2 D_u^0$ 和 $0.8 D_u^0$,然后再由(4)式计算其对应的厚度。这样的标准板既可用于标定仪器,又可作为产品的判废标准,使用十分方便。在制作上将对应的三块板连成一体呈台阶状(图 1)

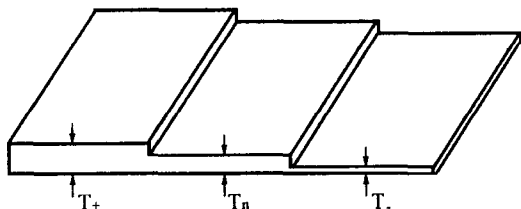


图 1 等效标准板

现以检测 U_3Si_2-Al 燃料板为例,具体说明计算方法。该燃料元件的芯体区 ^{235}U 面密度名义值为 35.23 mg/cm^2 , ^{235}U 丰度为 19.99% 。由此计算得到

$$D_u^0 = 176.2 \text{ mg/cm}^2$$

$$0.8 D_u^0 = 141.0 \text{ mg/cm}^2$$

$$1.2 D_u^0 = 211.5 \text{ mg/cm}^2$$

将上述三值依次代入(4)式,得到对应的三块等效标准板的厚度如下:

$$T_n = 17.4 \text{ mm}$$

$$T_+ = 20.6 \text{ mm}$$

$$T_- = 14.2 \text{ mm}$$

式中 T_n 、 T_+ 和 T_- 分别是等效铀面密度为 D_u^0 、和 $1.2 D_u^0$ 和 $0.8 D_u^0$ 的标准板厚度。

三、等效标准板的加工与测试

标准板的等效铀面密度的精度是由它的几何厚度的精度来保证的。所以在加工制作中对其厚度公差和表面粗糙度都要提出较严格的要求。由(4)式可见,板厚每改变 0.1 mm ,相应的铀面密度将变化 1.1 mg/cm^2 。为把标准板的等效铀面密度因机械加工产生的误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,其厚度加工公差应小于 $\pm 0.08 \text{ mm}$ 。板面粗糙度为 $\nabla 4$ 。对板的长度和宽度没有特殊要求,只要各板面远大于准直孔径即可。加工而成的标准板需经严格的测试和检

验,合格者方能使用。

1. 几何厚度的测量

加工精度是否满足设计要求,厚度是否均匀都要进行检查。首先自检,在各板的横向和纵向处各测两点厚度值,取平均。然后送计量部门外检。检查结果列在表 3。数据表明,自检和外检结果均在设计值的公差范围内。

表 3 厚度检查结果(mm)

板 号	自 检 结 果					外检平均值 (mm)	设计值 (mm)
	横向厚度(mm)		纵向厚度(mm)		平均值(mm)		
T _n —板	17.49	17.47	17.42	17.41	17.45	17.452	17.4±0.08
T ₊ —板	20.63	20.67	20.62	20.63	20.64	20.622	20.6±0.08
T ₋ —板	14.25	14.22	14.21	14.23	14.23	14.229	14.2±0.08

2. 等效铀面密度值的比对验证

利用研制的等效标准板标定测量系统后,测量一批样品,然后取样、用 ISO 标准化学分析方法进行比对验证。表 4 和表 5 分别为作者和标准化研究所利用上述方法获得的两组数据。两结果表明,γ 吸收法和化学分析法符合较好,证明等效标准板的等效铀面密度刻度值是准确可靠的。

表 4 γ 吸收法与化学分析结果比较(单位 mg/cm²)

样品号	1	3	4	5	A ₁	A ₂	A ₄	A ₅	A ₈
γ 吸收法	185.0	186.4	179.0	166.3	148.4	159.7	198.6	214.1	249.6
化学分析	187.8	188.7	185.5	169.7	147.6	164.0	200.6	212.5	250.3
理化偏差%	1.5	1.2	3.5	2.0	0.5	2.0	1.0	0.7	0.3

表 5 γ 吸收法与化学分析结果比较(单位 mg/cm²)

样品号	01	02	03	04	05	06
γ—吸收法	163.9	181.1	178.9	172.9	188.2	191.1
化学分析	166.9	179.6	179.8	178.4	187.3	181.8
理化偏差%	1.8	0.8	0.5	3.1	0.5	5.1

四、应用

迄今为止,利用研制的等效标准板对千余块 U₃Si₂—Al 燃料板进行了均匀性检测和评价,这些应用包括下列几个方面:

1. 标定测量系统

测量系统经预热调零后,测量各标准板的透射强度,并记入表 6 中。经最小二乘法处理后得到燃料板铀面密度的计算公式(5)

$$D_u = -157.0 \ln I + 1592 \tag{5}$$

式中: D_u— 被测燃料板的铀面密度; I — 射线的透射强度(计数/秒)。

表 6 测量系统的标定

板 号	T ₊	T _n	T ₋
透射强度, 计数/秒	6609	8215	10350
透射强度的对数	8.796	9.014	9.245
等效铀面密度, mg/cm ²	211.5	176.2	141.0

2. 用作工艺产品的判度标准

因 T₊ 和 T₋ 板的等效铀面密度值是根据 IAEA 推荐的研究堆板型元件在芯体均匀区铀均匀性不得超过 ±20% 的标准设定的^[4], 所以在检测燃料板时, 如果燃料板的扫描曲线在芯体均匀区超出 T₊ 和 T₋ 板的透射强度线(图 2), 则该板作报废处理。

3. 为元件生产工艺提供有关信息

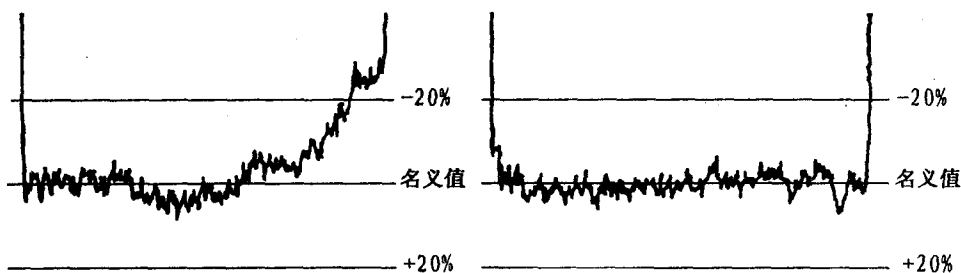


图 2 燃料板铀均匀性超过 20%

图 3 正常燃料板的扫描曲线

利用 T_n 板可画出铀面密度为名义值的燃料板的透射强度线。正常的燃料板的透射强度应在该线附近上、下波动(图 3)。但当芯体面积过大, 或铀的装载量不足时, 将会引起整块板的平均铀面密度偏低, 扫描曲线会偏离名义值曲线向上平移(图 4a)。反之, 会向下平移(图 4b)。这两种现象都会降低燃料板铀均匀性的合格率, 此时应把信息及时反馈给工艺。

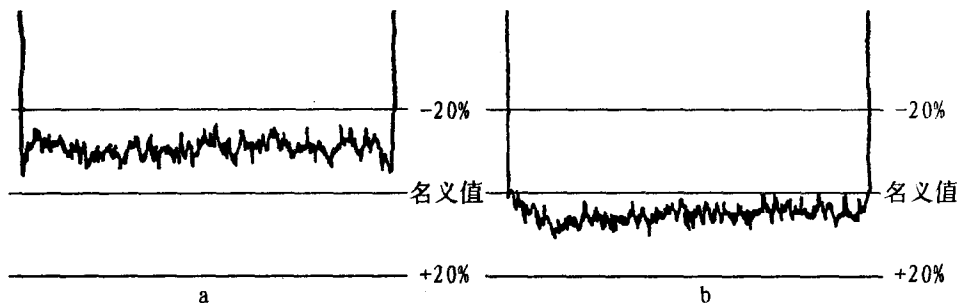


图 4 燃料板平均铀面密度变化引起扫描曲线上、下平移

五、等效标准板的相对性

等效标准板是对一定类型的被测燃料板专门设计制作的, 使用上具有相对性。如燃料板的铀面密度名义值、包壳材料、厚度、芯体成分等任何一个因素产生变化, 必须重新进行设计

制作。

本标准板的等效铀面密度刻度是采用 ^{241}Am 60keV γ 射线源,如改用其它能量的射线源,由于与能量直接相关的质量吸收系数相应变化,则刻度工作也须重新进行。物质对低能 γ 射线的吸收系数正比于 $\frac{Z^5}{A}$ (Z 为原子序数),如换用不同型号的铝材制作标准板,也须通过实验重新确定刻度方程(4)的系数,否则,杂质含量的差别将会带来误差。

参考文献

- [1] P. J. A. DE. MEESTER, Nuclear Techniques in the Basic Metal Industries, Proceedings of A Symposium, Helsinki, 31 July — 1 August 1972, IAEA Vienna (1973), p. 405
- [2] 王昭月等, 1985 核材料会议文集,《核科学与工程》(增刊)编辑出版, p. 41(1985)
- [3] IAEA, Research Reactor Core Conversion from HEU to LEU Fuels, Vol. 3, p. 1350. A Technical Document Issued by IAEA, Vienna. (1985)
- [4] IAEA, Research Reactor Core Conversion from HEU to LEU Fuels, Vol. 3, p 1268. A Technical Document Issued by IAEA, Vienna. (1985)

U₃Si₂-Al 板型燃料元件表面铀污染量的检测 及其数据处理系统

李淑兰 何凤歧 穆晓春

(核动力研究设计院)

王庆恒 韩景泉 苏宝恒

(中国辐射防护研究院)

摘 要

介绍 U₃Si₂-Al 板型燃料元件表面铀污染量的无损检测方法和检测装置的组成、工作原理及其数据处理系统,给出了标准样品的制备过程和刻度曲线。在 U₃Si₂-Al 板型燃料元件生产中,检测结果表明:α-计数法检测燃料元件表面铀污染量的方法是可靠的,采用新研制的“UB-1”型表面铀污染量检测仪,直接测定燃料元件板表面铀污染量具有灵敏度高,测量时间短,操作简便的特点,可定量探测下限为:5×10⁻¹⁰g/cm² 铀。其数据处理系统除数据采集、处理和存贮功能外,还具有数据统计、查询和报警等功能,可同时显示和打印检测结果,满足批量生产检测工作的需要。

前言

随着核工业的发展,反应堆燃料元件的形状越来越多,板型元件是其中一种。为防止回路冷却系统的污染和便于检测反应堆燃料元件是否有破损,因此,元件入堆前要求其表面去污,使元件表面污染控制到一定水平,因而燃料元件表面铀污染量是元件生产中质量控制技术指标之一。

国际上,通常要求研究堆板型燃料元件表面铀污染量是每块板为 5-10μg 铀限值^[1](相当于 0.5×10⁻⁸g/cm² 铀)。

由于元件芯体中核燃料的 β、γ-射线干扰,采用常规表面污染测量仪,无法解决表面铀污染量的准确测量,且面积小,灵敏度低均不能满足板型元件质量控制技术指标测试要求。用擦拭法,擦拭效率波动大,操作程序复杂,工作量大。用 α-计数法检测燃料板表面铀污染量,探测器采用流气式大面积低本底多丝正比计数器,根据流气式正比计数器计数特性曲线(见图 1),选择合适的工作高压,探测器只对 α-粒子计数,可以避免 β-射线及 γ-射线二次过程产生的 β 粒子对 α 计数的贡献。因此,检测系统灵敏度高,对²³⁵U 富集度为 20%的 U₃Si₂-Al 燃料板,每个板面一次测完,可直接给出高于 5×10⁻¹⁰g/cm² 铀的污染量,相对误差为 ±15%。

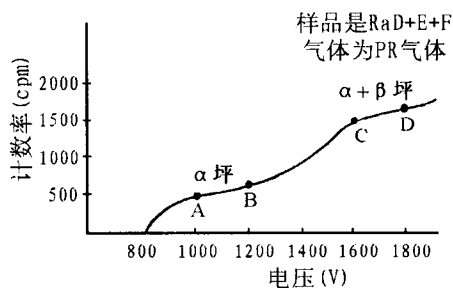
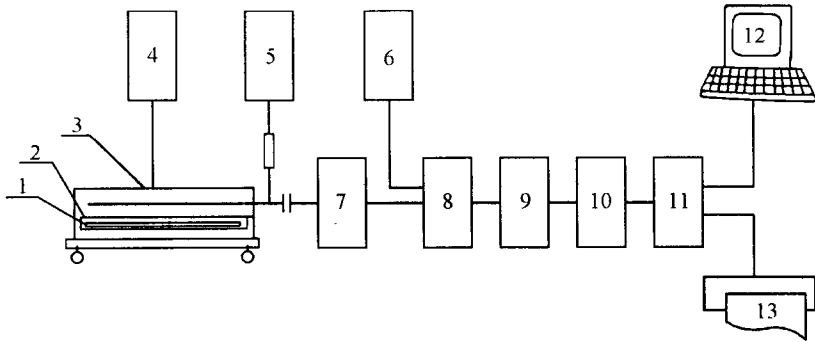


图 1 流气式正比计数器计数特性曲线

一、检测装置的组成和工作原理

整套装置由探测器、供气系统、主机和微机四大部分组成。测试系统方框图如图 2 所示。 U_3Si_2-Al 板型燃料元件芯体核燃料铀同位素放出的 α -粒子在包壳中的射程只有几十微米,芯体发出的 α -粒子不可能穿透包壳。因此,测得的燃料板 α 放射性即为元件板表面铀污染。

当元件板装到样品室后,元件板表面铀污染放出的 α -粒子穿过探测器阴极窗,将其内的工作气体(CH_4)电离,产生正负离子对。原始电离对的电子在高压电场作用下,被加速向阳极方向移动,电子在向阳极运动的途中可获得足够大的能量与气体碰撞而电离,产生新的离子对。继而由碰撞产生的电离电子又可获得足够大的能量产生新电离。这个过程是增殖的,称为“雪崩”过程。一个原始电离电子在“雪崩”过程中可产生 A 个电子一起到达阳极。(A 为正比计数器的“气体放大系数”,一般为 $10-10^4$ 。)探测器输出负电流脉冲,再经过电容积分形成电压脉冲,电压脉冲通过前置放大器输入到主放大器中,再经过甄别器成形输入到计算机接口电路,最后通过计算机处理,显示和打印出测量结果。



1—燃料板; 2—样品室; 3—探测器; 4—甲烷; 5—高压电源; 6—自检信号发生器; 7—前置放大器;
8—主放大器; 9—甄别器; 10—接口电路; 11—微机; 12—显示屏; 13—打印机

图 2 测试系统方框图

二、检测系统参数

2.1 探测器

探测器阴极由低本底材料制成,窗由几微米厚双面镀铝聚脂膜组成,能使绝大部分 α -粒子穿过,灵敏面积为 $1113cm^2$ 。阳极由多根直径很细的镀金钨丝组成,保证了计数器长期工作稳定性。

2.2 供气系统

工作气体用纯度为 99.99% 以上的甲烷气体,流量控制在 $0.05L/min$ 左右。

2.3 仪器系统供电

仪器是用直流供电避免交流及电磁干扰。低压供电电压为 $\pm 12V$,高压电源供电范围为 $0-2000V$,根据流气式大面积低本底多丝正比计数器计数特性曲线,通常选用 $1100V$ 。