

CNIC-01422

NFE-0013

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

核燃料元件生产线区段闭合衡算试验研究报告

PART CLOSE BALANCE TEST REPORT OF
NUCLEAR FUEL ELEMENT PRODUCTION LINE

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01422, NFE-0013: 核燃料元件
生产线区段闭合衡算试验研究报告/张强等著. —北京:
原子能出版社, 1999. 12

ISBN 7-5022-2112-3

I. 中... II. 张... III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 54008 号

©原子能出版社, 1999

原子能出版社出版发行

责任编辑: 郭向阳

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 mm 1/16 印张 1 字数 26 千字

1999 年 12 月北京第一版 1999 年 12 月北京第一次印刷

印数: 1—150

定价: 5.00 元



张强：工程师。1994年毕业于成都理工学院核工系。

ZHANG Qiang: Assistant engineer. Graduated from Nuclear Engineering Department of Chengdu University of Science and Engineering in 1994.

CNIC-01422

NFE-0013

核燃料元件生产线区段闭合衡算 试验研究报告

张 强 古德军 叶世茂 伍志明 孟 安 阎利永 邓仁林
(宜宾核燃料元件厂, 宜宾)

摘 要

为了实现核燃料元件生产线闭合衡算达标目标, 科学合理地评价一定平衡周期内的核材料无名损失 (MUF), 找出生产线整个测量系统中存在的薄弱环节、物料的主要流失点、MUF 产生的真正原因和提高测量系统的精度, 通过对芯块制造车间子平衡区的核材料进行跟踪管理以及对主要的物料形态二氧化铀粉末、二氧化铀芯块、八氧化三铀和磨削渣进行取样、分析、称重误差试验, 按照“ σ_{MUF} 计算统计方法”对试验数据进行处理, 确定了各关键测量点的随机误差和系统误差, 并对该平衡周期内的物料进行分层数据处理, 在此基础上计算出 $\delta_{\text{MUF}} = 0.11\%$ 。研究表明, 影响 δ_{MUF} 的因素主要来自于称重、取样和分析的系统误差。

Part Close Balance Test Report of Nuclear Fuel Element Production Line

(In Chinese)

ZHANG Qiang GU Dejun YE Shimao WU Zhiming
MENG An YAN Liyong DENG Renlin
(Yibin Nuclear Fuel Element Plant, Yibin)

ABSTRACT

To realize the objective of material close balance counting of nuclear fuel element production line, evaluate MUF (material uncounted for) in specific balance period scientifically and reasonably and to find out the weak link, the main losing point of material and the real reason of MUF of the whole measure system, so as to improve the precision of measuring system, based on tracing management of nuclear material in sub-balance region of pellet manufacture workshop and test of sampling, analysis and weighing on main material such as uranium dioxide powder, uranium dioxide pellet, uranous uranic oxide and grinding slag, the authors process the test data by " σ_{MUF} counting statistical method" to determine the random error and system error of each key measuring point. The data of material batches in the balance period are also processed and a result of $\delta_{\text{MUF}}=0.11\%$ is got. The result indicates that the influence factor of δ_{MUF} mainly comes from the system error of weighing, sampling and analysing.

引言

核材料闭合衡算,是国内近几年兴起的一个新课题,它是核材料管制工作的重要组成部分。国家对核材料管制工作非常重视,制定了各核材料生产线测量系统的测量误差的相对标准偏差的达标目标值。就核燃料元件生产线而言,其达标目标值为 $\delta_{\text{MUF}} < 0.3\%$ 。

核材料闭合衡算是建立在测量和帐目管理的基础上。对任何一个生产过程,以严格的帐目制度为基础,其无名损失(MUF)的期望值应为零,但由于存在测量误差,它实际不等于零,这时需计算 MUF 的标准偏差,在 95%的置信条件下,检查 MUF 值与零之间是否有统计的显著性差异。

由于我国在核材料闭合衡算达标方面起步较晚,与世界发达国家的水平相比,还有着明显的差距,特别是对核材料测量误差的研究还处于探索阶段,许多基础研究工作还没有开展,为了实现核燃料元件生产线闭合衡算达标目标,本次试验选定芯块制造车间离子平衡区作为研究对象,以某核电站的一次换料生产作为平衡周期,在该平衡周期内对物料进行跟踪管理,并对生产线上的主要物料形态 UO_2 粉末、 UO_2 芯块、 U_3O_8 和磨削渣的取样、分析、称重方法进行误差试验,在此基础上进行 δ_{MUF} 计算和 MUF 评价,分析各关键测量点对 δ_{MUF} 的影响程度,为我厂下一步核材料闭合衡算工作提供理论依据。

1 工艺简介

1.1 工艺流程

芯块制造以 UO_2 粉末为原料,经混料、预压、制粒,由旋转压机压制生成坯块,然后烧结、磨削成符合技术条件规定的成品芯块。其工艺流程见图 1。

1.2 关键测量点的设置

- (1) 流动关键测量点:磨削岗位
- (2) 盘存关键测量点:混料岗位、芯块库房

2 试验方法

2.1 核材料控制与跟踪管理

在生产过程中,对出入平衡区的物料进行称重,建立原始记录,以保证数据的准确性,防止出现漏项和重项,使生产线上的全部核材料进入衡算。

2.2 核材料取样、分析和称重

按照 IAEA 核材料衡算统计方法中的 δ_{MUF} 计算方法,结合本厂的具体情况,制定取样、分析和称重方法的误差试验方案。

3 测量误差试验研究

3.1 分析方法系统误差试验

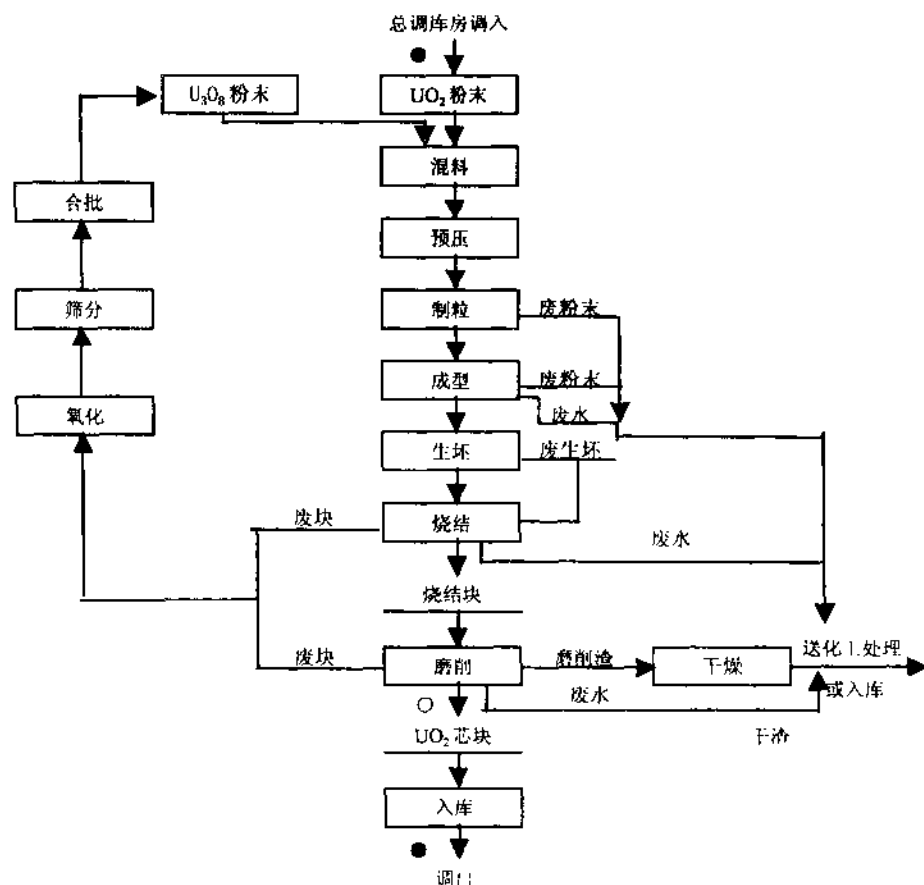


图1 UO_2 芯块制造工艺流程图

●——温点关键测量点；○——流动关键测量点

(图中两格●均为库房管理)

3.1.1 化学容量法

根据 IAEA 推荐的计算方法，将有关参数作一说明：

μ_0 ——标准样品的给定值

X_{ij} ——第 i 个测量条件下所作的第 j 次测量观测值 ($j=1, \dots, n_i$)

n_i ——第 i 个测量条件下所作的测量次数 ($i=1, \dots, m$)

n ——总的测量次数 ($n=\sum n_i$)

σ_0 ——标准样品给定值的标准偏差

σ_e^2 ——随机误差方差

σ_b^2 ——短期系统误差方差

本次试验是对国家一级标准物质 U_3O_8 (标准号: GBW04201, 纯度 99.945%) 在不同时间内用化学容量法进行铀含量测定, 测量结果如表 1 所示。

表1 U_3O_8 标准物质在不同时间铀含量测定结果

时间	次 数					
	1	2	3	4	5	6
1995.1	84.91	84.76	84.70	84.81	84.91	84.91
1995.3	84.74	84.91	84.76	84.81	84.81	84.65

按下列公式进行计算:

标准样品的给定值 $\mu_0 = 84.756\%$, $\sigma_0 = 0.04\%$ (二倍标准偏差)

$$(a) \quad T_1 = \sum_{j=1}^{n_1} X_{1j} = 84.91 + 84.76 + \cdots + 84.91 = 509.00$$

$$T_2 = \sum_{j=1}^{n_2} X_{2j} = 84.74 + 84.91 + \cdots + 84.65 = 508.68$$

$$(b) \quad T = \sum_{j=1}^m T_j = T_1 + T_2 = 509.00 + 508.68 = 1017.68$$

$$(c) \quad S_0 = T^2 / n = 86306.0485$$

$$(d) \quad S_1 = \sum_{i=1}^2 T_i^2 / n_i = 86306.0571$$

$$(e) \quad S_2 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^2 = 86306.1360$$

$$(f) \quad P = (n^2 - \sum_{i=1}^2 n_i^2) / n(m-1) = (144 - 72) / 12 \times 1 = 6$$

$$(g) \quad M_B = (S_1 - S_0) / (m-1) = 0.0085$$

$$(h) \quad M_\omega = (S_2 - S_1) / (n-m) = 0.0079$$

$$(i) \quad \text{偏差值: } \tilde{\theta} = T/n - \mu_0 = 84.8067 - 84.756 = 0.0507$$

$$(j) \quad \sigma_\omega^2 = M_\omega = 0.0079$$

$$(k) \quad \sigma_\theta^2 = (M_B - M_\omega) / P = 0.0001$$

(l) 如果未作偏差校正处理, 则测量结果系统误差方差估算值是:

$$(\tilde{\theta})^2 = (T/n - \mu_0)^2 = 0.0026 (U\%)^2$$

分析方法系统误差为 0.05%。

(m) 如果使用偏差校正, 则校正后测量结果的系统误差方差为:

$$\sigma_0^2 + (\sigma_\theta^2 / n^2) \sum_{i=1}^m n_i^2 + \sigma_\omega^2 / n = 0.0023 (U\%)^2$$

分析方法系统误差为 0.048%。

3.1.2 库仑电位滴定法

库仑电位滴定法采用重铬酸钾标准溶液(国家一级标准物质, 标准号: GBW(E) 060018)来测定其系统误差。经测定, 该方法的系统误差优于 0.05% (相对值)。

3.2 取样方法随机误差试验

3.2.1 UO_2 粉末取样方法随机误差试验

在某核电站的一次换料生产中,共产出 55 批 UO_2 粉末,每批粉末按照生产取样规程进行取样、制样,用化学容量法进行分析,其铀总量及偏差处理结果如表 2 所示:

表 2 某核电站的一次换料 UO_2 粉末铀含量及偏差

批次	铀总量/%	批次	铀总量/%	批次	铀总量/%
32T9423	87.72	32T9400C	87.29	32T9506	87.50
32T9424	87.90	32T9505P	87.58	32T9505A-	87.44
32T9426	87.62	32T9516R2	87.72	32T9504P	87.66
32T9427	87.59	32T9521	87.66	32T9504-	87.40
32T9428	87.75	32T9522A	87.77	32T9508	87.44
32T9429	87.80	32T9514A	87.48	32T9501A	87.34
32T9430	87.79	32T9517R2A	87.89	32T9507-	87.42
32T9501	87.75	32T9525A	87.54	32T9527	87.39
32T9502	87.66	32T9515R1A	87.72	32T9506-	87.64
32T9428	87.75	32T9520A	87.68	32T9528	87.69
32T9504	87.63	32T9524A	87.68	32T9529	87.44
32T9525A	87.84	32T9523A	87.61	32T9501P	87.59
32T9505	87.64	32T9519A	87.52	32T9510	87.32
32T9507	87.77	32T9518A	87.48	32T9502P	87.57
32T9503A	87.80	32T9526A	87.70	32T9502	86.86
32T9510	87.79	32T9506P	87.54	32T9503P	87.47
32T9509	87.60	32T9507P	87.73	32T9509-	87.36
32T9508	87.76	32T9508P	87.55	32T9503-	86.96
32T9513	87.56				

平均值 $\bar{X} = 87.59\%$; 标准偏差 $SD = 0.20\%$; 相对标准偏差 $RSD = 0.23\%$

用相对标准偏差扣除已知的分析方法随机误差 (0.07%) 与短期系统误差 (0.01%) 后,取样方法的随机误差为 0.22%。

3.2.2 UO_2 芯块取样随机误差试验

在生产过程中,芯块取样是在每批中随机抽取一块芯块用库仑电位滴定法进行铀总量分析,表 3 是某核电站的一次换料生产中各批芯块的铀总量分析数据及偏差处理结果。

用相对标准偏差扣除已知的分析方法随机误差 (0.04%) 后,取样方法的随机误差为 0.03%。

3.2.3 废 U_3O_8 取样方法随机误差试验

废 U_3O_8 是由杂质含量或物理性能不合格的烧结芯块经氧化而制得,用作添加剂或返料生产。在盛装 U_3O_8 桶中随机选取 2 桶,在每桶的上、中、下三个部位各取一个样品,用化学容量法作铀总量分析,每个样品分析两次,分析结果如表 4 所示:

表 3 某核电站的一次换料生产芯块铀总量及偏差

批号	铀总量/%	批号	铀总量/%	批号	铀总量/%
32P9502+	0.8802	32P9527+	0.8813	32P9522+	0.8802
32P9503+	0.8803	32P9526+	0.8803	32P9523+	0.8807
32P9504+	0.8798	32P9529+	0.8806	32P9524+	0.8807
32P9505+	0.8804	32P9530+	0.8808	32P9525+	0.8806
32P9506+	0.8805	32P9531+	0.8805	32P9501	0.8804
32P9507+	0.8805	32P9532+	0.8805	32P9502-	0.8798
32P9508+	0.8811	32P9533+	0.8808	32P9503-	0.8800
32P9509+	0.8812	32P9534+	0.8806	32P9504-	0.8812
32P9510+	0.8808	32P9535+	0.8807	32P9547+	0.8805
32P9511+	0.8792	32P9536+	0.8808	32P9548+	0.8803
32P9512+	0.8794	32P9537+	0.8799	32P9549+	0.8805
32P9513+	0.8806	32P9538+	0.8803	32P9550+	0.8800
32P9514+	0.8802	32P9539+	0.8794	32P9505-	0.8800
32P9515+	0.8809	32P9540+	0.8806	32P9506-	0.8810
32P9516+	0.8800	32P9541+	0.8797	32P9507-	0.8807
32P9517+	0.8805	32P9542+	0.8800	32P9508-	0.8808
32P9518+	0.8803	32P9543+	0.8799	32P9546+	0.8802
32P9519+	0.8802	32P9544+	0.8804	32P9545+	0.8806

平均值 $\bar{X}=0.8804$; 标准偏差 $SD=0.045\%$; 相对标准偏差 $RSD=0.050\%$

表 4 不同桶、不同部位取样铀含量测定结果

容器号	分析次数 T_n	样品中铀含量 %			$T\%$
		S_1	S_{10}	S_{11}	
2039	1	84.94	84.79	84.44	$T_1=508.24$
	2	84.84	84.79	84.44	
	T_{10}	169.78	169.58	168.88	
9319	1	84.69	84.44	84.94	$T_2=507.99$
	2	84.69	84.44	84.79	
	T_{20}	169.38	168.88	169.73	

$T=1016.23$

根据 IAEA 推荐的公式计算结果为:

由分析造成的随机误差方差为: $0.0027 (U\%)^2$

分析方法的随机误差为: 0.05%

由取样造成的随机误差方差为: $0.0494 (U\%)^2$

取样方法的随机误差为: 0.20%

3.2.4 磨削渣取样方法随机误差试验

UO₂ 芯块经无心磨床磨削后产生的磨削渣经过烘干处理, 然后进行装桶贮存。本次试验在盛装磨削渣的桶中随机选取了 5 桶, 每桶取 3 个样品, 用化学容量法作铀总量分析, 每个样品分析两次, 分析结果如表 5 所示:

表 5 磨削渣中铀含量测定结果

容器号	分析次数 T_n	样品中铀含量/%			$T/\%$
		S-1	S-2	S-3	
2048	1	85.19	85.70	85.80	$T_1=512.88$
	2	85.09	85.50	85.60	
	T_y	170.28	171.20	171.40	
9320	1	85.19	84.79	85.19	$T_2=510.65$
	2	85.30	84.99	85.19	
	T_y	170.49	169.78	170.38	
9322	1	85.19	84.44	84.44	$T_3=508.29$
	2	85.19	84.59	84.44	
	T_y	170.38	169.03	168.88	
9315	1	85.30	85.09	84.94	$T_4=510.55$
	2	85.19	85.09	84.94	
	T_y	170.49	170.18	169.88	
2045	1	85.19	84.79	85.19	$T_5=510.49$
	2	85.19	84.94	85.19	
	T_y	170.38	169.73	170.38	
					$T=2552.86$

将数据处理后的结果为:

由分析造成的随机误差方差为: $0.0066 (U\%)^2$

分析方法的随机误差为: 0.08%

由取样造成的随机误差方差为: $0.0676 (U\%)^2$

取样方法的随机误差为: 0.3%

3.3 取样方法系统误差试验

取样方法的系统误差是所有测量参数中最难估算的, 它是指测量值均按同一方向或周期性的偏离真值的偏差, 常见的原因有取样程序不当, 取样器有缺陷或者测量仪器设备标定有误, 材料在取样或分样过程或在取样前受污染, 材料在取样过程或取样后保存和处理中发生了物理或者化学变化等。本次试验未进行取样方法的系统误差研究。

3.4 称量方法误差试验

3.4.1 称量方法系统误差试验

3.4.1.1 衡器选择及标定

UO₂ 粉末称量衡器: 类型: TGT-500 型台秤; 分度值: $d=200\text{ g}$; 最大称量: 500 kg;

最小称量: 15 kg; 出厂编号: 265。

UO₂ 芯块称量衡器: 类型: EDI 型电子秤; 分度值: $d=20$ g; 最大称量: 60 kg; 最小称量: 5 kg; 出厂编号: 982073。

UO₂ 粉末容器皮重量值点: ~ 60 kg; 毛重量值点: ~ 330 kg (本次试验 UO₂ 粉末未装满, 只对量值点为 140 kg 进行了标定)。

UO₂ 芯块容器皮重量值点: ~ 20 kg; 毛重量值点: ~ 40 kg。

标定方法: 在称量衡器检定合格的基础上, 对每个量值点标定 10 次, 采用称量、吊起、再称量、吊起的方法。标定结果如表 6 所示。

表 6 TGT-500 型台秤和 EDI 型电子秤标定记录表

称量次数	TGT-500 型台秤		EDI 型电子秤	
	皮重量值点	皮重量值点	皮重量值点	皮重量值点
	60.00 kg	140.00 kg	20.00 kg	40.00 kg
1	60.10	139.90	20.00	40.00
2	60.05	139.90	20.00	40.00
3	60.05	139.90	20.00	40.00
4	60.10	139.90	20.00	40.00
5	60.05	139.90	20.00	40.00
6	60.05	140.00	20.00	40.00
7	60.05	139.95	20.00	40.00
8	60.05	139.90	20.00	40.00
9	60.05	139.95	20.00	40.00
10	60.05	139.95	20.00	40.00

注: 标定时间 1995 年 11 月 30 日。

3.4.1.2 称量方法的系统误差计算

按 IAEA 推荐的方法有关参数定义如下:

μ_g ——标准砝码给定的毛重点量值标准值;

μ_t ——标准砝码给定的皮重点量值标准值;

σ_g ——给定的毛重点标准砝码的标准偏差;

σ_t ——给定的皮重点标准砝码的标准偏差;

$\bar{X}_g$ ——毛重量值点标准砝码称量 n_g 次的平均值;

$\bar{X}_t$ ——皮重量值点标准砝码称量 n_t 次的平均值。

(1) TGT-500 型台秤的系统误差

因为 $\mu_g = 140$ kg, $\mu_t = 60$ kg

根据 JJG99-90 砝码检定规程

$\sigma_g = 7$ g 是标准砝码给定的毛重标准偏差;

根据 JJG99-90 砝码检定规程,

$\sigma_t = 3$ g 是标准砝码给定的皮重标准偏差。

由表 6 的数据可求出:

毛重点标定砝码称量 10 次平均值

$$\bar{X}_g = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_{gi}}{n} = (139.900 + \dots + 139.950) / 10 = 139.925 \text{ (kg)}$$

皮重点标定砝码称量 10 次平均值

$$\bar{X}_t = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_{ti}}{n} = (60.100 + \dots + 60.050) / 10 = 60.06 \text{ (kg)}$$

毛重点标定称量值方差

$$S_g^2 = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_{gi}^2 - (\sum_{i=1}^{10} X_{gi})^2 / n}{n-1} = 1.244 \times 10^{-3} \text{ (kg}^2\text{)}$$

皮重点标定称量值方差

$$S_t^2 = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_{ti}^2 - (\sum_{i=1}^{10} X_{ti})^2 / n}{n-1} = 4.440 \times 10^{-4} \text{ (kg}^2\text{)}$$

标定砝码净重偏差值为:

$$\tilde{\theta} = (\bar{X}_g - \mu_g) - (\bar{X}_t - \mu_t) = (139.925 - 140) - (60.060 - 60) = -0.135 \text{ (kg}^2\text{)}$$

不作偏差校正的系统误差:

$$\sigma_s^2 = (\tilde{\theta})^2 = 0.018 \text{ (kg}^2\text{)} = 18000 \text{ (g}^2\text{)}$$

因实际生产过程中未进行偏差校正, 因此在计算 δ_{net} 时应采用不作偏差校正时的系统误差。

(2) EDI 型电子秤的系统误差

EDI 型电子秤标定结果如表 6 所示, 由于每次读数相同, 不能用 IAEA 的方法计算, 该电子秤的系统误差引用厂计量站 1993 年 3 月 24 日的测试报告, 其系统误差为 10 g。

3.4.1.3 称量方法的随机误差计算

用“方差分析法”求 UO_2 粉末和 UO_2 芯块的称量随机误差方差

符号说明:

X_{ij} ——对第 i 桶物料的第 j 次称量值;

n_i ——对第 i 桶物料的称量次数;

n ——称量总次数;

m ——称量物料的桶数;

S_{ho}^2 ——随机误差方差。

(1) TGT-500 型台秤的随机误差

本次试验在平衡区内选取了 4 桶粉末, 每桶称 5 次, 其测量结果如表 7 所示:

按下列公式进行计算:

$$(a) \quad T_i = \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} = 2795.950$$

表 7 UO_2 粉末称量结果表

容器号	次 数				
	1	2	3	4	5
E-1	140.500	140.500	140.500	140.500	140.500
E-4	142.000	142.050	142.100	142.100	142.100
E-5	134.100	134.100	134.100	134.100	134.100
E-7	142.500	142.500	142.500	142.500	142.600

$$(b) S_1 = \sum_{i=1}^m T_i^2 / n_i = 391094.476$$

$$(c) S_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^2 = 391094.492$$

$$(d) S_{\text{随}}^2 = (S_2 - S_1) / \sum_{i=1}^m (n_i - 1) = (S_2 - S_1) / (n - m) = 0.016 / 16 = 0.001 (\text{kg}^2)$$

随机误差为 32 g。

(2) EDI 型电子秤的随机误差

随机选取 4 盘芯块，每盘称量 5 次，其结果如表 8 所示：

表 8 UO_2 芯块称量结果

容器号	次 数				
	1	2	3	4	5
2-1427	33.20	33.20	33.20	33.20	33.20
2-887	30.66	30.66	30.66	30.66	30.66
2-39	26.72	26.72	26.72	26.72	26.72
2-719	36.60	36.60	36.60	36.60	36.60

因每次称量结果都相同，按数理统计方法中的均匀分布规律可求出它的方差为：

$$D\xi = E\xi^2 - (E\xi)^2 = (b-a)^2 / 12$$

$$\text{其偏差为：} SD = \sqrt{(b-a)^2 / 12} = 6 \text{ g}$$

4 核材料闭合衡算及测量误差数据

4.1 平衡基础数据

本次平衡周期内各种衡算数据见表 9。

4.2 不平衡差 (MUF) 计算

计算方法：

不平衡差 (MUF) = 期初存量 + 调入量 - 期末存量 - 调出量 - 已知损失量

根据表 9 的数据可得出该平衡周期内的 MUF 值为：79.38 (kg U)

4.3 核材料测量误差数据

生产线上各关键测量点的取样、分析、称重方法的随机误差和系统误差数据见表 10。

表 9 芯块制造车间核材料库存及库存变化表

物料名称	物项数	批数	物料量/kg	金属量/kg U
期初库存:				
科研粉末	1	1	12.25	10.72
科研芯块	1	1	4.77	4.20
废芯块	42	42	919.23	809.84
设备滞留量	9	9	110.76	96.96
上期污泥	60	1	920.30	32.53
本期调入:				
UO ₂ 粉末	262	55	69942.16	61272.67
本期调出:				
成品芯块	2710	52	58094.44	51148.33
废芯块	29	29	9301.11	8188.70
废粉末	10	10	769.57	654.62
废 U ₃ O ₈	5	5	304.22	258.80
磨削渣	15	15	2092.74	1779.02
空桶滞留量	262	1	7.60	6.66
污泥	21	21	438.23	58.81
废水	34	34	31600.01	7.27
可燃废物	50	1	3651.00	71.70
期末结存:				
设备滞留量	9	9	21.60	18.91
有名损失:				
废气	1	1		5.20
账面结存数				62226.92
实物盘点数				62147.54
不平衡差 (MUF)				79.38

5 MUF 检验及评价

5.1 评价依据

σ_{MUF} 的计算方法如下:

$$\sigma(\text{MUF})^{1/2} = V(\text{MUF}) \quad (1)$$

$$V(\text{MUF}) = V_r(\text{MUF}) + V_c(\text{MUF}) \quad (2)$$

$$V_r(\text{MUF}) = \sum_{k=1}^K V_r(X_{k\text{qpt}}) = \sum_{k=1}^K \left[X_{k\text{qpt}}^2 \left(\delta_{r\text{q}}^2 / n_k m_k + \delta_{\text{m}}^2 / r_k m_k + \delta_{\text{c}}^2 / c_k r_k m_k \right) \right] \quad (3)$$

表 10 测量误差数据表

物料名称	层/KMP	测量方法及编号	每批测量数	误差	
				随机	系统
科研粉末	KMP-B-1	TGT-500 型台秤 (1)	1	32 g	135 g
		取样 (1)	1	0.0022	/
		化学容量法 (1)	1	0.0007	0.0005
科研芯块	KMP-C	芯块电子秤 (2)	1	6 g	10 g
		取样 (2)	1	0.0003	/
		库仑电位滴定法 (2)	1	0.0004	0.0005
废芯块	KMP-F-3	TGT-500 型台秤 (1)	1	32 g	135 g
		取样 (2)	1	0.0003	/
		库仑电位滴定法 (2)	1	0.0004	0.0005
设备滞留量	KMP-F-5	经验估算 (6)	1	/	0.5
上期污泥	KMP-F-4	TGT-500 型台秤 (1)	60	32 g	135 g
		取样 ()		/	/
		化学容量法 (4)	1	0.0008	0.0005
UO ₂ 粉末	KMP-B-2	TGT-500 型台秤 (1)	5	32 g	135 g
		取样 (1)	1	0.0022	/
		化学容量法 (1)	1	0.0007	0.0005
成品芯块	KMP-C	芯块电子秤 (2)	7	6 g	10 g
		取样 (2)	1	0.0003	/
		库仑电位滴定法 (2)	1	0.0004	0.0005
废芯块	KMP-F-3	TGT-500 型台秤 (1)	1	32 g	135 g
		取样 (2)	1	0.0003	/
		库仑电位滴定法 (2)	1	0.0004	0.0005
废粉末	KMP-F-1	TGT-500 型台秤 (1)	1	32 g	135 g
		取样 (1)	1	0.0022	/
		化学容量法 (1)	1	0.0007	0.0005
废 U ₃ O ₈	KMP-5	TGT-500 型台秤 (1)	1	32 g	135 g
		取样 (3)	1	0.002	/
		化学容量法 (3)	1	0.0005	0.0005
磨削渣	KMP-F-2	TGT-500 型台秤 (1)	1	32 g	135 g
		取样 (4)	1	0.003	/
		化学容量法 (4)	1	0.0008	0.0005
空桶滞留量	KMP-B-3	TGT-500 型台秤 (1)	1	32 g	135 g
		化学容量法 (4)	1	0.0008	0.0005
污泥	KMP-F-4	TGT-500 型台秤 (1)	21	32 g	135 g
		取样 ()		/	/
		化学容量法 (4)	1	0.0008	0.0005
废水	KMP-F-6	取样 ()		/	/
		化学容量法 (4)	1	0.0008	0.0005
可燃废物	KMP-H	无损检测法 (5)	1	/	0.135
设备滞留量	KMP-F-5	经验估算 (6)	1	/	0.5

$$V_s(\text{MUF}) = \sum_q M_q^2 \delta_{sq}^2 + \sum_p M_p^2 \delta_{sp}^2 + \sum_t M_t^2 \delta_{st}^2 \quad (4)$$

而

$$M_q = \sum_{k=1}^K A_k \cdot (X_{kqpt}) \quad (\text{取 } X_{kqpt} \text{ 与 } q \text{ 有关}) \quad (5)$$

$$M_p = \sum_{k=1}^K A_k \cdot (X_{kqpt}) \quad (\text{取 } X_{kqpt} \text{ 与 } p \text{ 有关}) \quad (6)$$

$$M_t = \sum_{k=1}^K A_k \cdot (X_{kqpt}) \quad (\text{取 } X_{kqpt} \text{ 与 } t \text{ 有关}) \quad (7)$$

上述公式中的有关符号分别表示如下:

$V(\text{MUF})$: MUF 的方差, 下标标注表示为何种方差;

X_{kqpt} : K 层的元素总重量;

K: 层总数;

δ : 相对标准偏差;

r: 应用的下标, 表示随机误差;

S: 应用的下标, 表示恒定系统误差;

q: 应用的下标, 表示称量方法;

p: 应用的下标, 表示取样方法;

t: 应用的下标, 表示分析方法;

n_k : K 层中每批的物项数;

m_k : K 层中物料的批数;

r_k : K 层中每批物料的取样个数;

c_k : K 层中每个样品的分析次数。

对于 A_k , 当表示期初或调入层时, $A_k = +1$, 当表示调出或期末层时 $A_k = -1$ 。

由于表 10 的误差数据中, 总体称量误差是以绝对值形式给出的, 因此在公式计算中, 应将相对误差进行换算, 两者的关系表示为: $\delta_q = n_k \cdot m_k \cdot \sigma_q / X_{kqpt}$ 。 σ_q 代表称量绝对误差, 将此关系分别代入公式 (3) 和 (4) 可得到:

$$V_r(\text{MUF}) = \sum_{k=1}^K (n_k m_k \sigma_{rq}^2 + X_{kqpt}^2 \delta_{rp} / r_k m_k + X_{kqpt}^2 \delta_{rt}^2 / c_k r_k m_k) \quad (8)$$

$$V_s(\text{MUF}) = \sum_q \sum_{k=1}^K (A_k n_k m_k)^2 \sigma_{sq}^2 + \sum_p M_p^2 \delta_{sp}^2 + \sum_t M_t^2 \delta_{st}^2 \quad (9)$$

5.2 核材料平衡的分层及分层数据 (见表 11)

5.3 $\sigma(\text{MUF})$ 的计算

由表 9~11 给出的实物盘存、误差数据和分层数据, 用上述的公式计算如下:

随机误差方差:

$V_r(1)=0.0016$	$V_r(2)=0.00004$	$V_r(3)=0.046$
$V_r(4)=0$	$V_r(5)=0.06$	$V_r(6)=364.11$
$V_r(7)=12.675$	$V_r(8)=0.61$	$V_r(9)=0.24$
$V_r(10)=0.06$	$V_r(11)=2.05$	$V_r(12)=0.27$