

前 言

编制本标准的目的在于对气载放射性核素的 γ 能谱分析法提出一个规范化要求,使监测方法统一或具有相互可比性,以保证测量结果的质量,为环境放射性监测和卫生评价提供数据。目前国内外尚未制定气载放射性核素 γ 能谱分析方法的标准,但有同类型的其他环境监测标准可供参考。

本标准对气态碘采样与监测法作了较全面的阐述,突出了空气采样分析的特点。本标准是采用八十年代以来国内外发表的最新资料结合已有经验编写的。

本标准从2000年5月1日起实施。

本标准的附录A、B、C、D都是提示的附录。

本标准由卫生部卫生法制与监督司提出。

本标准起草单位:军事医学科学院放射医学研究所。

本标准主要起草人:申成瑶。

本标准由卫生部委托卫生部工业卫生实验所负责解释。

中华人民共和国卫生行业标准

空气中放射性核素的 γ 能谱分析方法

WS/T 184—1999

Gamma spectrometry method of
analysing radionuclides in air

1 范围

本标准以过滤法收集气载放射性污染物样品,用高分辨率 H_pG_e 或 $G_e(Li)\gamma$ 能谱仪确定空气中 γ 放射性核素组成及其浓度的方法。

本标准适用于对核设施或操作开放型放射性同位素的工作场所及周围环境空气放射性污染的监测。

2 引用标准

下列标准所包含的条文,通过在本标准中引用而构成本标准的条文。本标准出版时,所示版本均为有效。所有标准都会被修订,使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB/T 7167—1996 锗 γ 射线探测器测试方法

GB/T 11713—1989 用半导体 γ 谱仪分析低活度 γ 放射性样品的标准方法

GB/T 11743—1989 土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法

3 定义

本标准采用下列定义。

3.1 工作场所和环境空气监测 workplace and ambient air monitoring

对操作放射性物质的工作场所及周围环境空气放射性浓度的监测。

3.2 空气取样器 air sampler

收集空气样品的装置。由滤料和固定滤料、引导气流的固料夹组成的空气过滤器。

3.3 呼吸带 breathing zone

指在人的面部前面的半球区域,半球的中心是两耳连线的中点,半径 30 cm。在工作过程中该区的空气会被吸入肺。

3.4 呼吸带取样 breathing zone sampling

在相当于工作人员呼吸带区域安装空气取样器进行的空气取样。

3.5 个人空气取样器 personal air sampler

工作人员个人佩戴于呼吸带部位的微型空气取样器,用以采集呼吸带空气样品。此采样器获得的样品能代表个人吸入空气污染物(气态或气溶胶)的浓度。

3.6 气溶胶 aerosol

固体或液体微粒在空气或其他气体中形成的分散系。其粒径通常在 $0.01\ \mu\text{m}$ 至 $100\ \mu\text{m}$ 之间。

4 方法概述

用玻璃纤维滤材和活性炭滤筒相串接组成空气取样器,能分别收集空气中气溶胶态和气态(包括气

中华人民共和国卫生部 1999-12-09 批准

2000-05-01 实施

态无机和有机碘化物)的放射性污染物,然后将收集的滤样置于 $H_p G_c \gamma$ 谱仪上测量,利用能谱分析软件对测得的 γ 能谱数据进行解谱分析,即可得出 γ 核素的组成及相应的活度,再对有关参数进行修正后,计算出各 γ 核素在空气中的放射性浓度。

5 仪器与设备

5.1 空气采样系统

空气采样系统由空气取样器、缓冲瓶、流量计、针阀和抽气泵 5 部分组成,见图 1。

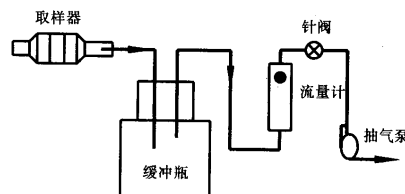


图 1 空气采样系统组成示意图

5.1.1 空气取样器:由滤料、固料夹组成。固料夹主要起固定滤料和引导气流的作用,可用不锈钢或合金铝加工制成。固料夹限定滤料的有效采样面积宜与探测器的直径相配合,一般采样直径较探测器的直径小,常用采样直径约 25~50 mm。组合取样器如图 2 所示。

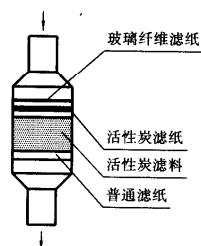


图 2 组合取样器示意图

5.1.2 滤料:应根据取样目的和采集对象,选用合适的高效滤料。本标准推荐三种滤料:

a) 超细玻璃纤维滤纸。用于采集气溶胶态放射性污染物。对市售滤纸要用光照检查是否该滤纸有明显孔眼。

b) 处理过的活性炭滤纸。用 10% 炭重的三乙撑二胺(TEDA)或碘化钾(KI)作浸渍剂浸渍椰子壳活性炭,活性炭粒度 $\leq 50 \mu m$,以桑皮纸浆作衬底,纸浆厚度 $7 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$,制成活性炭滤纸,其质量厚度为 $13 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。可用于采集元素态碘和气溶胶态放射性物质。

c) 处理过的活性炭滤筒。滤筒可用不锈钢或合金铝制成,内径比探测器直径稍小,外径应与测量架相配合,滤筒全长约 6 cm,出气端有不锈钢丝网,内衬一层普通滤纸以防止炭粒被抽走。用 5%~10% 炭重的 TEDA 或 2% 炭重的 TEDA 和 2% 炭重的碘化钾浸渍剂浸渍椰子壳炭或油棕炭,炭粒度 $\leq 50 \mu m$,将炭粒填冲筒内,炭层厚 5 cm。滤筒用于收集气态有机放射性碘化物。

5.1.3 流量计:常用转子流量计,其量值应经法定计量单位标定,刻度误差 $\leq \pm 3\%$ 。

5.1.4 抽气泵:抽气装置必须保证取样系统有足够体积的空气流过,以满足所用测量方法对采样体积的要求。

5.2 样品盒:用于装滤料样品供 γ 谱仪直接测量。聚乙烯塑料压制扁圆盒,盒盖和底的厚度 $\leq 1 \text{ mm}$,盒深 10 mm,内径可放入滤样,外径与测样架相匹配以便固定其测样位置。

5.3 γ 谱仪

谱仪系统由屏蔽室、 H_pG_c 或 $G_c(Li)$ 探测器、前置放大器、脉冲线性放大器、ADC 模数转换器、MCA 多道脉冲高度分析器(或 MCA 卡+PC 计算机)和输出打印等设备组成。各组成部分的规格、技术应满足标准 GB/T 11713、GB/T 11743 和 GB/T 7167 中对谱仪和探测器性能的检测要求。

6 采样方法

6.1 采样系统的连接与安装

按图 1 连接各部件。将滤料固定于取样器中,用橡胶管把采样头出气端通过缓冲瓶与流量计下端进气口连接,流量计排气端接针阀,其后再接抽气泵,然后检查管道和接口处是否有泄漏。检查方法:可将排气端管夹死,从进气端打气,在管道接口处涂上肥皂水,看是否产生气泡,以不产生气泡为准。

6.2 采样选点

应根据监测计划要求和监测对象,选择采样位置和采样数,使采集的样品能代表工作场所的状况。

6.3 核设施附近环境的空气采样

取样器应置于侧面有进风口或百叶窗的防雨罩内(或将取样器进气口面垂直于地面),在距核设施下风向不同距离的开阔地面(避开高大建筑物或大树对气流的影响),距地面 1.5 m 高处采样。同时还应在上风向选点采样作参照比较。

6.4 工作场所的空气采样

取样器应置于工作人员常停留位置或需调查的位置,距地面 1.5 m 高采样。

6.5 个人呼吸带采样

将个人空气取样器佩带在呼吸带部位,连续佩带一个或两个工作班采样。注意采样器气流速减小与供采样器的电池电压维持恒定气流的时间关系,当连续工作时间较长流速显著降低时,应及时更换电池再采样,并作好记录。

6.6 采样时应注意气流量的变化,及时调节阀门维持所需气流量。采样结束应记下当时的气象条件、采样起止时间及其气流量或采气总体积。卸下取样器,采样面朝上卸开,轻轻取出滤纸或滤筒。将滤纸平放于样品盒中,加盖密封待测;滤筒两端盖上塑料帽待测。

6.7 最小采气量

当采样点空气放射性浓度不详时,由式(1)估计最小采气量。

$$V = 10 \times LLD/DAC \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中: V ——最小采气量, L;

LLD ——测量方法的探测下限, Bq;

DAC ——被检核素的导出空气浓度, $Bq \cdot L^{-1}$ 。

或按厂家或法定计量单位提供的滤料最佳流速参数采样,保证采样时达到最佳流速要求。

6.8 流量计的校准

6.8.1 在采样系统中将一只经过法定计量单位刻度过的标准流量计分两次分别串接于待标定流量计的前和后,控制阀门抽取不同流量的气体,标准流量计置于前和后两次测试流量的平均值作为待标定流量计的刻度值。在低流量下可直接用皂膜流量计法进行刻度。

6.8.2 对气压和温度影响的修正:用式(3)将采集空气的体积换算成标准状态下的体积。

设气流量为 Q , 采样时间为 t , 则采样体积 V_r 计算如式(2)所示:

$$V_r = Q \times t \quad \dots\dots\dots (2)$$

标准状态下的采气体积 V_0 为:

$$V_0 = V_r \times [(T_0 \times p)/(T \times p_0)] \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中: V_r ——采样气体体积, m^3 ;

Q ——采样气体流量, $m^3 \cdot min^{-1}$;

t ——采样时间, min;

V_0 ——标准状态气体体积, m^3 ;

p ——采样处气压, kPa ;

p_0 ——标准状态下的大气压, 取值 101.3 kPa ;

T_0 ——标准状态下气温的绝对温度, $T_0 = 273.16^\circ\text{C} + 24^\circ\text{C}$;

T ——采样状态下气温的绝对温度, 采样时的摄氏温度值与 273.16 。

6.9 采样效率的确定

6.9.1 取样器的采样效率等于测出滤料采集单位体积空气的放射性活度与已知同体积空气的放射性活度之比值。

6.9.2 每种滤料应按实际采样条件对不同状态的气载物进行采样效率标定。

6.9.3 对气态放射性物质(属单分散相)采样效率的标定用相对比较法, 方法见附录 A。

6.9.4 对气溶胶态(属多分散相)采样效率的标定, 用法定计量单位标定过的高效取样器与待标定的取样器并联采样, 然后二者比较用已知采样效率定出未知的采样效率。

6.9.5 如以乙酸脂微球 $0.3 \mu\text{m}$ AMAD 作为标准气溶胶源在气室中发生气溶胶(属单分散相), 对此气溶胶采样, 其采样效率标定也可用 6.9.3 的相对比较法, 但应注明所用的参考标准。

7 谱仪刻度

7.1 谱仪定量分析需用已知 γ 射线能量及活度的标准源, 模拟成被测样品, 在测样条件下对谱仪进行能量和探测效率刻度, 然后用刻度的能量和效率对样品的未知成分进行定量分析。

7.2 测量时源(或样品)与探测器之间控制一定距离, 使谱仪测量的计数率小于或等于 $1\,000 \text{ cps}$, 以减少因计数率高而发生的脉冲堆积和峰位移, 降低对多能 γ 源的随机符合相加效应。样品距 G_e 探测器表面应不小于 10 cm 。

7.3 能量刻度

7.3.1 刻度源

用一组发射单能或多能 γ 射线刻度源来刻度。能量范围应包含被检样品的 γ 射线能量, 一般取 $50 \sim 3\,000 \text{ keV}$ 。

7.3.2 方法

将刻度源放于谱仪测样位置测量, 从所测能谱中定出全能峰中心道址, 将峰中心道址与对应的 γ 射线能量值用最小二乘法拟合合成式(4)的对应关系(通称谱仪的能量响应关系)。

$$E_i = \sum_{n=0}^N A_n X_i^n \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中: E_i ——峰对应第 i γ 射线的能量, keV ;

X_i ——峰中心所在的道址, 道数;

A_n ——拟合多项式的待求参数;

N ——多项式次数。对 $G_e(\text{Li})$ 谱仪, N 等于 4 或 5, 取决于所呈现的非线性度。

7.4 峰形参数的刻度

峰形参数刻度是确定不同全能峰峰宽与相应 γ 射线能量的关系, 系解谱程序的重要参数。在测样条件下测出单能 γ 射线刻度源的脉冲能谱, 用计算机解谱程序求出各峰的分布参数 σ , 并由式(5)计算半宽度 $FWHM$ 。对不同能量的全能峰求出对应的 σ_i 和 $FWHM_i$ 值, 用最小二乘法拟合合成式(6), 确定 $FWHM$ 与 γ 射线能量的关系。

$$FWHM = 2.36\sigma \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$FWHM = A + B \times E + C \times E^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中: A, B, C ——拟合系数;

E —— γ 射线能量, keV 。

7.5 效率刻度

7.5.1 全能峰效率直接刻度法：谱仪探测全能峰效率等于谱仪测得特征 γ 射线 i 的全能峰净峰面积 S_{pi} (计数率)与源发射该 γ 射线的强度 $I_i=A_0 \cdot f_i$ 之比值。制备一组已知放射性活度的单能 γ 射线标准源液(经法定计量单位标定其活度,不确定度 $\leq \pm 5\%$),分别取一定源液均匀滴于滤纸上制成与空气滤样直径相同的刻度面源,装入垫有一层玻璃纤维滤纸的样品盒中,用压圈将滤纸压平,其面与滤样面同高,然后加盒盖密封放在谱仪测样位置测量。对测出的脉冲谱用谱分析程序定出各单能 γ 射线的全能峰面积 S_{pi} ,除以相应的 γ 射线的活度 I_i ,所得的商即为该 γ 射线全能峰的探测效率 ϵ_{pi} ,用式(7)表示。

$$\epsilon_{pi} = S_{pi} / (A_0 \cdot f_i) \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中： S_{pi} ——能量 E_i γ 射线的净峰面积,cps;

A_0 ——被测源的放射性活度,Bq;

f_i ——发射 E_i γ 射线的几率,即 γ 分支比或称发射率;

滤样刻度源制备方法见附录B。

7.5.2 相对效率刻度法：相对效率等于测得能量 E_i γ 射线的净峰面积与发射此 γ 射线的相对强度比之比值。相对强度比是同一多能 γ 源中任一 E_i γ 射线的发射率与选定参考能量 E_m 的 γ 射线发射率之比值。对高分辨率 $H_p G$ 。探测器可以用1~2个含有多能 γ 射线的源作相对效率刻度,然后用一已知活度的单能标准源作效率归一。此方法优点是只需确知刻度源各条 γ 射线的相对强度比,对源的活度不一定要求已知。所选源的 γ 射线能量范围应复盖被测样品的 γ 射线能量。面源制作和测量过程与(7.5.1)相同。刻度方法见附录C。

7.5.3 效率刻度结果应在刻度的能量范围内进行曲线拟合,建立效率 ϵ_i 与 γ 射线能量 E_i 间的经验关系式(8)。

$$\ln(\epsilon) = \sum_{j=0}^{n-1} a_j \times [\ln(E)]^j \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中： a_j ——拟合系数。

$n-1$ ——拟合阶数,常取3。

效率刻度的不确定度应 $\leq \pm 10\%$ 。

7.6 滤筒总探测效率刻度法

气态有机放射性碘通过活性炭滤筒时,被阻留和吸附于活性炭层中,其存留量随滤筒深度呈指数递减式分布。因此,刻度滤筒测量效率的困难在于不易制出模拟实际分布的刻度源。本标准采用实验和理论计算相结合的方法确定滤筒活性炭的采样和测量效率之积,以此作为滤筒的总探测效率 Δ ,方法详见附录D。

8 测量与核素分析

8.1 测量滤料本底

取同批干净滤料,放于样品盒中加盖密封,在与效率刻度相同的条件下测量,其峰区计数的统计误差应满足 $\leq \pm 5\%$ 的精度要求。

8.2 样品的测量

从取样器中取出滤料。对滤纸将采样面向上平放于样品盒内加盖密封,对滤筒两端盖上塑料帽,在与效率刻度相同的条件下测量,使最小峰的计数统计误差 $\leq \pm 5\%$ 。

8.3 核素分析

核素分析除采用GB/T 11743和GB/T 11713的基本方法外,对配有谱分析程序的G₀谱仪,用前述能量、效率和峰形参数刻度曲线,微机 γ 能谱分析软件即可自动分析未知测量谱的核素组成。解谱程序应经标准谱或已知的混合多能 γ 标准源进行检验,证明它对弱峰和重峰的分解能力。本标准推荐使用MicroSAMPO谱分析软件,它具有较好地分解多重峰和弱峰的能力。谱分析程序应包括指定解谱区段

边界、段内全能峰个数、设置判峰域值,执行数据光滑、寻峰、判断重峰和单峰、扣本底、求峰面积、根据峰能和核素库确定相应核素,计算各组成核素的放射性活度。

8.4 空气放射性浓度的计算

空气中放射性核素 j 的浓度 C_j 由式(9)计算:

$$C_j = S_{pji} \cdot (R \cdot f_{ji} \cdot V \cdot \zeta \cdot \epsilon_{pi})^{-1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中: S_{pji} ——核素 j 的 $E_i\gamma$ 射线全能峰净峰面积, cps;

R ——衰变校正系数;

f_{ji} ——核素 j 发射 $E_i\gamma$ 射线的发射率(即分支比);

V ——采气总体积, m^3 ;

ζ ——滤料的采样效率;

ϵ_{pi} —— $E_i\gamma$ 射线的全能峰探测效率。

对滤筒采集气态碘而言,式(9)中 ζ 和 ϵ (采样和探测效率)二者之积代表滤筒的总探测效率 Δ ,用 Δ 代入式(9)中即得滤筒采集气态碘的放射性浓度。

8.5 衰变校正

当采样时间、放置时间和测量时间大于待测核素的半衰期时,应对核素在各时间间隔的衰变进行校正,式(10)、(11)、(12)给出衰变校正算法。

$$R_1 = 1 - e^{-\lambda \cdot t_1} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$R_2 = e^{-\lambda \cdot t_2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$R_3 = 1 - e^{-\lambda \cdot t_3} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中: R_1, R_2, R_3 ——分别代表采样、放置和测量时间内的衰变校正项;

t_1 ——采样开始至结束的时间, min;

t_2 ——采样结束至测样开始时间, min;

t_3 ——测样开始至结束时间, min;

λ ——放射性核素衰变常数, min^{-1} 。

9 结果报告

9.1 测量结果应报告谱仪的探测下限。报告样品核素活度超过探测下限的空气浓度及其标准差,并注明所采用的置信度(通常用 95% 的置信度)。对低于探测下限的核素其浓度以“小于 LLD”表示。

9.2 样品计数标准差 S_0 用式(13)计算:

$$S_0 = \sqrt{[(N_s \cdot (t_s^2)^{-1}) + (N_b \cdot (t_b^2)^{-1})]} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中: N_s ——全能峰计数;

N_b ——峰区的本底计数;

t_s, t_b ——分别为测样品和本底的时间。

附录 A

(提示的附录)

滤料采集气态碘效率刻度方法

A1 气态碘源发生器

A1.1 气态碘源发生器是产生无机和有机气态放射性碘的设备,供滤料收集效率刻度用。

A1.2 原料:无载体放射性 Na^{131}I 和 HNO_3 、 NaOH 、 N_2 。

A1.3 器材:反应瓶,鼓风机,湿度温度指示器,恒温控制设备,气体混合室。

A2 气态碘源制备法

A2.1 在反应瓶中将 Na^{131}I 加入 10 mol/L HNO_3 100 mL 溶液中,保持 100℃ 温度,使其氧化产生气态碘。产生的气态碘用鼓泡法以 $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速,连续通以氮气携带气体将气态碘从 10 mol/L 氢氧化钠(20 mL)溶液中洗出。

A2.2 随后将气态碘引入约 6 m^3 混合室内,并以 $10 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 流速通以不同湿度的空气与之循环混合老化,作为采样用的放射性气态碘源。

A2.3 可在气态碘进入混合室内不同时间采样,5 h 之内采样可用作活性炭滤纸采集无机碘的效率刻度,5 h 以后采样,可作为活性炭滤筒采集有机碘效率的刻度。

A3 滤料采样效率刻度法

A3.1 实验装置如图 A1 示意图。

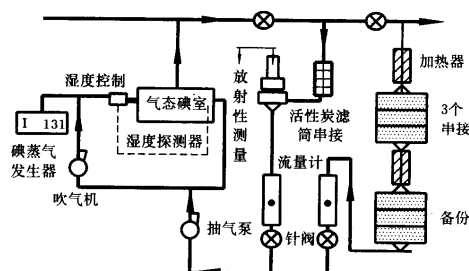


图 A1 滤料采样效率刻度实验装置示意图

A3.2 将装有相同滤料(滤纸+滤筒)的待刻度的采样器,三只串接于采样气路中,在一定温度、湿度和气流流量下采样。

A3.3 采集一定体积后,在相同测量条件下,分别测定三只采样器的滤料放射性的计数率,并分别令其为 N_1 、 N_2 和 N_3 。

A3.4 式(A1)计算待刻度滤料(即第一级)的采样效率 ζ_1 :

$$\zeta_1 = N_1 / (N_1 + N_2 + N_3) \quad \dots\dots\dots (A1)$$

重复 3~5 次采样测量,求平均采样效率和标准偏差。

A3.5 改变湿度和温度及采样气流量,重复上述过程,确定滤料在不同采样条件下对气态碘的采样效率。

附录 B

(提示的附录)

刻度源制备方法

B1 制源用具

- B1.1 万分之一分析天平。
 B1.2 特制两尖嘴微型称量壶。
 B1.3 标准放射性源液 5 mL, 比活度 C_s 约 100 Bq/mL (或 Bq/mg), 不确定度 $\leq \pm 5\%$ 。
 B1.4 无水酒精, 蒸馏水, 棉球。
 B1.5 玻璃纤维滤纸和普通滤纸。剪切成与采样器和样品盒的内径相同两层滤纸待用。
 B1.6 移液架和微调吸液器。

B2 操作方法

- B2.1 将样品盒洗净烘干, 盒内放一层已剪切好的玻璃纤维滤纸, 再放一张已标出滴液位置的普通滤纸, 向滤纸加入 2 mL 酒精使滤膜全浸润待用。
 B2.2 用细橡胶管将微调吸液器与称量壶短嘴相连接, 壶的细长嘴伸入标准源液中, 调节微调吸液器吸取一定量的源液, 用棉球擦去吸嘴外壁沾附的源液。
 B2.3 小心从橡胶管上取下微型称量壶, 在天平上称量, G_1 (mg)。再连接上橡胶管, 将细长嘴置于滴源滤纸上方, 从纸中心向外滴源液。
 B2.4 调节微调吸液器控制源液均匀滴在滤纸上, 待源液稍干后压上压圈, 盖上盒盖密封。
 B2.5 滴完源液后移开样品盒, 取下称量壶, 再称小壶重量 G_2 (mg);
 B2.6 计算制源活度, 见式 (B1), (B2), (B3)

$$\text{滤纸上滴的源液量 } G = G_1 - G_2 \quad \dots\dots\dots (B1)$$

$$\text{滤纸源的活度 } A_s = G \cdot C_s \quad \dots\dots\dots (B2)$$

$$\text{制源总的不确定 } \Delta = \sqrt{(\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2)} \quad \dots\dots\dots (B3)$$

式中: Δ_1, Δ_2 ——称重 G_1 和 G_2 的相对标准偏差;

Δ_3 ——源标定比活度的相对标准偏差。

B2.7 另制一滤纸面源, 方法同上 B2.1~B2.6, 将滤纸源封于薄塑料膜内, 专用于夹在活性炭滤筒内模拟刻度滤筒的探测效率。制一个源用一个称量壶, 以防源液污染。

B2.8 检验制源方法的精密度, 可同时制三个平行源, 然后在相同条件下测量, 取三个平行源全能峰计数平均值的相对标准偏差表示。

附录 C

(提示的附录)

相对效率刻度法

C1 原理与方法

C1.1 将刻度源放于谱仪测样位置测量, 测得的谱用解谱程序定出各全能峰的净峰面积, 并除以相应能量的 γ 射线相对强度比, 所得商即为该 γ 射线的相对探测效率。将相对效率与 γ 射线能量在对数坐标

纸上绘图,并用最小二乘法拟合相对效率刻度曲线。另外用一个已知放射性活度的单能 γ 射线标准源如 ^{137}Cs 在相同条件下确定其全能峰的效率。从相对效率曲线查出单能 γ 射线对应能量的相对效率值,用已知效率与相对效率之比值将其他能量的相对效率归一为全能峰效率。

C1.2 对发射多 γ 射线的核素 j ,谱仪测出能量为 E_i 的 γ 射线全能峰探测效率, ϵ_{ji} 可用式(C1)确定。

$$\epsilon_{ji} = n_{pji} / (A_j \times \phi_{ji}) \quad \dots\dots\dots (\text{C1})$$

式中: n_{pji} ——测出核素 j 发射能量为 E_i 的 γ 射线的全能峰净峰面积,cps;

A_j ——源放射性核素 j 的放射性活度,Bq;

ϕ_{ji} ——每一次核蜕变发射 E_i γ 射线的发射率,或称 γ 分支比。

C1.3 在同一源中任选一能量为 E_m 的 γ 射线作参考线,它的 γ 发射率为 ϕ_{jm} ,相应的峰探测效率由式(C2)确定。

$$\epsilon_{jm} = n_{pjm} / (A_j \times \phi_{jm}) \quad \dots\dots\dots (\text{C2})$$

C1.4 对 E_i γ 射线与参考线 E_m 的全能峰效率之比为:

$$\begin{aligned} \epsilon_{ji} / \epsilon_{jm} &= (n_{pji} / n_{pjm}) / (\phi_{ji} / \phi_{jm}) \\ &= (n_{pji} / \phi_{ji}) \times (1 / n_{pjm}) \quad \dots\dots\dots (\text{C3}) \\ &= \epsilon'_{ji} / n_{pjm} \end{aligned}$$

式中: $\epsilon'_{ji} = n_{pji} / \phi_{ji}$ ——定义为对能量 E_i 的 γ 射线之相对效率。

$\phi_{ji} = \phi_{ji} / \phi_{jm}$ ——能量为 E_i 的 γ 射线之相对强度比。

C1.5 将 ϵ'_{ji} 与 γ 能量 E_i 的对应关系取对数作图,即得相对效率曲线,并用最小二乘法拟合即得相对效率与能量的关系式。

C1.6 用一已知活度的单能 E_k γ 标准源在同样条件下测量,定出此 γ 线的全能峰效率为 ϵ_k ,从相对效率曲线上查出 E_k 的相对效率为 ϵ'_k ,两者之比值为 R_K 。

$$R_K = \epsilon_k / \epsilon'_k \quad \dots\dots\dots (\text{C4})$$

对任一 γ 射线 E_i 的全能峰探测效率 ϵ_i 可用式(C5)计算。

$$\epsilon_i = R_K \cdot \epsilon'_i \quad \dots\dots\dots (\text{C5})$$

式中: ϵ'_i —— E_i γ 射线的相对效率。

用最小二乘法将全能峰效率与能量的关系拟合合成(C6)式。将此式中所求参数输入谱仪效率刻度数据库,用于谱分析程序计算解未知核素的放射性活度。

$$\ln(\epsilon) = \sum_{j=0}^{N-1} a_j \times [\ln(E)]^j \quad \dots\dots\dots (\text{C6})$$

式中: a_j ——拟合待求系数;

$N-1$ ——拟合阶数, $N-1$ 等于3或4。

C2 刻度H,G。谱仪全能峰效率的多 γ 射线源见表C1。

表 C1 多 γ 射线源及其相对强度

核素名	γ 能量 keV	相对强度 %	核素名	γ 能量 keV	相对强度 %	核素名	γ 能量 keV	相对强度 %	
^{152}Eu	121.8 ¹⁾	141.0 \pm 4.0	^{56}Co	2 015.3	2.9 \pm 0.2	^{214}Bi	1 377.7	8.87 \pm 0.15	
	244.7 ¹⁾	36.6 \pm 1.1		2 034.8	8.2 \pm 0.6	^{214}Bi	1 509.2	4.78 \pm 0.09	
	344.3 ¹⁾	127.2 \pm 1.3		2 598.5	18.0 \pm 0.9	^{214}Bi	1 729.6	6.29 \pm 0.10	
	411.1	10.7 \pm 0.11		3 202.1	3.2 \pm 0.35	^{214}Bi	1 847.4	4.52 \pm 0.09	
	444.0	15.0 \pm 0.15		3 253.5	7.7 \pm 0.9		^{214}Bi	2 118.6	2.53 \pm 0.05
	778.9	62.6 \pm 0.6		3 273.1	1.71 \pm 0.25		^{214}Bi	2 204.2	10.77 \pm 0.20
	867.4	20.5 \pm 0.21		3 451.5	0.93 \pm 0.2		^{214}Bi	2 447.9	3.32 \pm 0.08
	964.0	70.5 \pm 0.21	$^{226}\text{Ra}^{2)}$	186.2	9.00 \pm 0.1	^{76}Se	66.0	1.77 \pm 0.2	
	1 085.8	48.7 \pm 0.5		242.0	16.06 \pm 0.2		96.7	5.6 \pm 0.5	
	1 112.1	65.0 \pm 0.7		$^{214}\text{Pb}^{2)}$	295.2		42.01 \pm 0.53	121.1	28.2 \pm 1.4
1 408.0	100.0 \pm 1.0	^{214}Pb	351.9		80.42 \pm 0.81		136.0	98.2 \pm 4.6	
^{56}Co	847.0	100.0	$^{214}\text{Bi}^{2)}$	609.3	100.00 \pm 0.92		198.6	2.4 \pm 0.12	
	1 037.8	12.9 \pm 0.5	^{214}Bi	768.6	10.90 \pm 0.15	264.7	100		
	1 175.1	2.3 \pm 0.23	^{214}Bi	934.1	6.93 \pm 0.10	279.5	43.2 \pm 2.2		
	1 238.0	69.3 \pm 1.47	^{214}Bi	1 120.3	32.72 \pm 0.39	303.9	2.3 \pm 0.12		
	1 360.0	4.2 \pm 0.21	^{214}Bi	1 238.1	12.94 \pm 0.17	400.6	19.6 \pm 1.2		
	1 771.3	16.5 \pm 0.8							
	<p>1) 此三条线是 Eu-152 中最强的,其跃迁相对强度一致性较差,前两者相对于第三条线强度变化从 0.91 到 1.17。低能峰有高能干扰不易分开,在刻度时不宜作效率计算用。</p> <p>2) Ra-226 与子体平衡时发射的最强的 γ 线。</p>								

附 录 D

(提示的附录)

滤筒的总探测效率刻度法

D1 气态有机化合物在滤筒中随筒深的分布呈指数规律分布,对滤筒 0~ x 段的采样效率定义见式(D1):

$$\zeta = 1 - e^{-ax} \quad \text{..... (D1)}$$

在滤筒深 x 处的截面层 dx 的采样效率 ζ_{dx} 可从式(D1)微分导出:

$$\zeta_{dx} = ae^{-ax} \cdot dx \quad \text{..... (D2)}$$

式中: a ——有机碘在给定的滤筒活性炭中的分布参数;

x ——距进气表面活性炭的垂直深度,cm。

D2 分布参数 a 的实验确定。用组合滤料(玻璃纤维滤纸+活性炭滤纸+滤筒活性炭)取样器,在一定的气流面速度 V ,温度 T 和相对湿度 H 条件下,采集气态碘源(见附录 A 中 A3.1)的样品,采样后将滤筒炭分成 4~6 层,每层厚 5~10 mm,分别在相同条件下测量每层的计数率。然后在半对数坐标纸上绘出计数率与层深 x 的关系曲线,此曲线近似呈直线。该直线的斜率即为分布参数 a 。对不同温度、湿度和气流面速度条件 i ,重复此过程可以获得相应的分布参数值 a_i 。

D3 用标准放射性碘源液制做的薄层滤纸面源(附录 B),并用塑料薄膜两面包封。将面源放于滤筒活性炭层不同深度处(面源代表该层截面上的活度),然后分别测量并定出源在不同深处碘的全能峰探测效率 ϵ_{px} ,并用最小二乘法拟合不同深度 x 处截面层的峰探测效率与层深 x 的函数关系为二次函数关系:

$$\epsilon_{px} = AX^2 + BX + C \quad \dots\dots\dots (D3)$$

式中：A、B、C——根据实验值用最小二乘法拟合求出的方程系数。

D4 将式(D2)和(D3)相乘，得出滤筒深X处截面的采样与测量效率的乘积，并定义为X层的总探测效率。对滤筒0~d深度的总探测效率Δ则是二者乘积表达式在0~d的积分，由式(D4)表示：

$$\begin{aligned} \Delta &= \int_0^d \epsilon_{px} \times \zeta_{cdx} \\ &= \int_0^d (AX^2 + BX + C) \times ae^{-ax} dx \\ &= A/\{a^2[2 - (a^2d^2 + 2ad + 2)e^{-ad}]\} \\ &\quad + B/\{a[1 - (ad + 1)e^{-ad}]\} + C(1 - e^{-ad}) \quad \dots\dots\dots (D4) \end{aligned}$$

D5 从D2和D3实验获得的不同采样条件下的分布参数 a_i 和A、B、C值代入式(D4)中，即可计算出不同采样条件下的总探测效率Δ值。

D6 用采样时的条件从标定曲线中查出相应的参数值，用式(D4)计算总探测效率Δ，即可用于式(8)计算气态碘的空气浓度。