



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 593—2006

个人与环境监测用 X、 γ 辐射 热释光剂量测量（装置）系统

Thermoluminescence Dosimetry Systems Used in Personal
and Environmental Monitoring for X and Gamma Radiation

2006-03-08 发布

2006-09-08 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

**个人与环境监测用 X、 γ
辐射热释光剂量测量
(装置) 系统检定规程**

**Verification Regulation of Thermoluminescence
Dosimetry Systems Used in Personal and
Environmental Monitoring for
X and Gamma Radiation**

JJG 593—2006
代替 JJG 593—1989
JJG 698—1990

本规程经国家质量监督检验检疫总局 2006 年 3 月 8 日批准，并自 2006 年 9 月 8 日起施行。

归口单位：全国电离辐射计量技术委员会

起草单位：上海市计量测试技术研究院

湖北省计量测试技术研究院

本规程委托全国电离辐射计量技术委员会负责解释

本规程起草人：

李燕飞 （上海市计量测试技术研究院）

陈建新 （上海市计量测试技术研究院）

周迎春 （湖北省计量测试技术研究院）

目 录

1 范围·····	(1)
2 引用文献·····	(1)
3 术语和计量单位·····	(1)
3.1 术语·····	(1)
3.2 计量单位·····	(2)
4 概述·····	(3)
5 计量性能要求·····	(3)
6 通用技术要求·····	(4)
6.1 剂量计·····	(4)
6.2 读出仪·····	(4)
7 计量器具控制·····	(4)
7.1 检定条件·····	(4)
7.2 检定项目·····	(6)
7.3 检定方法·····	(6)
7.4 检定结果的处理·····	(8)
7.5 检定周期·····	(8)
附录 A 剂量当量转换因子 ·····	(9)
附录 B 热释光剂量计和读出仪的性能要求及其测试方法 ·····	(12)
附录 C X 参考辐射的特性和产生条件 ·····	(15)
附录 D 置信界限 ·····	(17)
附录 E 检定证书 (内页) 格式 ·····	(20)

个人与环境监测用 X、 γ 辐射热释光剂量 测量（装置）系统检定规程

1 范围

本规程适用于个人监测用和环境监测用 X、 γ 辐射热释光剂量测量(装置)系统(以下简称系统)的首次检定、后续检定和使用中检验。光子能量范围为 15keV~3.0MeV。

本规程不适用于个人监测和环境监测用 X、 γ 辐射热释光剂量计的单独检定。

本规程不适用于配用肢端剂量计的用于个人监测的装置，也不适用于测量 β 辐射、中子辐射和宇宙射线辐射装置的检定。

2 引用文献

本规程引用下列文献：

IEC 1066 - 1—1991：Thermoluminescence dosimetry systems for personal and environmental monitoring(1991)

GB/T 12162.1—2000《用于校准剂量仪和剂量率仪以及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射——第 1 部分：辐射特性及产生方法》

GB/T 12162.2—2004《用于校准剂量仪和剂量率仪以及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射——第 2 部分：8keV~1.3MeV 和 4MeV~9MeV 的参考辐射的剂量测定》

GB/T 12162.3—2004《用于校准剂量仪和剂量率仪以及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射——第 3 部分：场所剂量仪和个人剂量计的校准及其能量响应和角响应的测定》

使用本规程时，应注意使用上述文献的现行有效版本。

3 术语和计量单位

3.1 术语

3.1.1 热释光 [thermoluminescent (TL)]

某些特定物质所具有的特性，即当这些物质经电离辐射或紫外线辐照后再被加热时因受辐照的激发而产生的光发射现象。

3.1.2 热释光探测器(简称探测器) [thermoluminescent (TL) detector]

规定数量的热释光材料，或由热释光材料和非热释光材料配合组成的具有确定质量、形状或尺寸大小的一个固定部件。

3.1.3 热释光剂量计(简称剂量计) [thermoluminescent (TL) dosimeter]

含有一个或数个热释光探测器的被动式测量装置, 为便于使用它可能被安置在一个盒套内, 以便于佩戴在人员的身体上或放置在测量环境中, 从而可用来确定其所放置的位置处或附近的剂量当量。

3.1.4 热释光剂量读出仪(简称读出仪) [thermoluminescent (TL) dosimeter reader]

用来测量由热释光剂量计中的热释光探测器所发出的光线的仪器, 基本上包括有一个加热装置、一个测光装置和附属的电子线路。

3.1.5 热释光剂量测量系统(简称系统) [thermoluminescent dosimetry (TLD) system]

为确定剂量当量评定值所使用的热释光剂量计、读出仪和所有的配套设备以及所有的工作程序。

3.1.6 周围剂量当量 $H^*(d)$ [ambient dose equivalent $H^*(d)$]

辐射场中某一点处的周围剂量当量 $H^*(d)$ 是相应的齐向扩展场在 ICRU 球体内、逆向齐向场的半径上深度 d 处产生的剂量当量。

注:

1. 对采用 $H^*(d)$ 形式的监测, 推荐的深度 d 为 10mm, 此时 $H^*(d)$ 可写为 $H^*(10)$ 。
2. 在扩展场中, 在所研究的整个体积内光子注量及其角分布、能量分布与实际场中的参考点具有相同值。在齐向扩展场中, 注量及其能量分布同上述扩展场, 但其注量是单向的。

3.1.7 个人剂量当量 $H_p(d)$ [individual dose equivalent, $H_p(d)$]

个人剂量当量 $H_p(d)$ 是人体表面某一指定点下深度为 d 处的软组织的剂量当量。对强贯穿辐射的监测, 推荐的深度 d 为 10mm, 此时 $H_p(d)$ 可写为 $H_p(10)$ 。对弱贯穿辐射的监测, 推荐的深度 d 为 0.07mm, 此时 $H_p(d)$ 可写为 $H_p(0.07)$ 。

3.1.8 转换因子(conversion factor)

用以将空气比释动能转换成相应剂量当量的参数因子, 见表 2 及附录 A。

3.1.9 评定值 E [evaluated value]

系统所需测量的量值 [如通过使用适当的评定因子 F_e 从热释光读出仪的读出值 R 而获得的定向剂量当量 $H'(10)$ 、空气比释动能 K_a 等]。

3.1.10 评定因子 F_e (evaluation factor)

用来将热释光读出仪的某一个或一组读出值 r 转换成要求的评定值 E 的一个或一组系数。

3.1.11 体模(phantom)

在 X 和 γ 辐射的散射和吸收特性方面用来模仿人体的一种特定的物体。

3.2 计量单位

3.2.1 个人剂量当量的计量单位是希沃特,符号: Sv, $1\text{Sv}=1\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3.2.2 空气比释动能的计量单位是戈瑞,符号: Gy, $1\text{Gy}=1\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3.2.3 照射量的计量单位和符号均为 $\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3.2.4 本规程中所用到的其他量均采用国际单位制(SI)单位。另外对辐射能量也可采用电子伏,符号: eV, $1\text{eV}=1.602\times 10^{-19}\text{J}$, 时间单位除秒(s)之外可采用分(min)、时(h)、日(d)和年(a)。

4 概述

本规程涉及的测量系统主要由热释光剂量计(简称剂量计)和热释光剂量读出仪(简称读出仪)以及所有的配套设备和工作程序组成。

剂量计通常由一个或多个热释光探测器和一个便于携带的适宜容器组成。

读出仪用于测量热释光探测器的发光量。主要由加热部件、光测量部件和有关电子器件组成。

剂量计受辐照时,热释光探测器吸收并贮存射线的部分能量,在测读过程中被加热时以光的形式释放这部分能量,并为读出仪测得,在一定剂量范围内发光量与剂量成线性关系。

热释光剂量测量系统按其用途可分为个人监测系统和环境监测系统两大类。

5 计量性能要求

热释光剂量测量系统的主要辐射性能必须满足表 1 的要求。

表 1 热释光剂量系统辐射性能要求

主要辐射性能	量值或影响量的量值范围	技 术 要 求
线性	$P(7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$: $0.5\text{mSv}\sim 1\text{Sv}$ $P(1\,000\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$: $0.1\text{mSv}\sim 1\text{Sv}$ $E(\text{A II})(7\text{d})$: $10\mu\text{Sv}\sim 100\text{mSv}$ $E(\text{A II})(30\text{d})$: $30\mu\text{Sv}\sim 100\text{mSv}$	响应变化不大于 10%
能量响应	$P(\text{A II})$: $15\text{keV}\sim 3\text{MeV}$ $E(30\text{keV})(\text{A II})$: $30\text{keV}\sim 3\text{MeV}$	评定值与约定真值相差不大于 30%
	$E(80\text{keV})(\text{A II})$: $30\text{keV}<E<80\text{keV}$ $E(80\text{keV})(\text{A II})$: $80\text{keV}\leq E\leq 3\text{MeV}$	评定值不大于约定真值的 2 倍 评定值与约定真值相差不大于 30%
刻度因子	$P(\text{A II})$, $E(\text{A II})$	给出实测值
量值检验	$P(\text{A II})$, $E(\text{A II})$	已知能量参考辐射: 15% 其他能量点: 30%

其中, P 表示热释光个人监测系统, E 表示热释光环境监测系统; 个人监测系统 P 又可根据其测量点在组织内的深度区分为 $7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 级和 $1\,000\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 级, 分别以 $P(7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$ 和 $P(1\,000\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$ 表示; 环境监测系统 E 可按其所测能量下限分为 30keV 级和 80keV 级、按其最短使用周期可分为 7d 级和 30d 级, 分别表示为 $E(30\text{keV})(7\text{d})$ 、 $E(80\text{keV})(7\text{d})$ 、 $E(30\text{keV})(30\text{d})$ 和 $E(80\text{keV})(30\text{d})$; (A II) 表示可同时适用于所有级别。

6 通用技术要求

6.1 剂量计

6.1.1 剂量计外观应完好无缺损并带有编号等识别标记, 所附的佩带夹持装置应能正常工作。剂量计各部件包括内部的热释光探测元件装配应紧密, 不应随意活动脱落。其外壳应能避光、防潮并且在使用中不易被放射性沾污, 又能便于清除沾污。

6.1.2 被检剂量计应符合的批均匀性、重复性和入射角响应的相关要求和测试方法见附录 B。

6.2 读出仪

6.2.1 读出仪外观应完好无缺损, 铭牌上的型号、编号、制造厂和  标志/编号等标记应清晰可辨。

6.2.2 被检读出仪应符合的稳定性/重复性的有关要求和测试方法见附录 B。

7 计量器具控制

计量器具控制包括首次检定、后续检定和使用中检验。

7.1 检定条件

7.1.1 计量标准

7.1.1.1 照射量或空气比释动能率的约定真值用防护水平电离室型剂量仪测量, 其量值应可溯源至国家照射量或空气比释动能基准。

7.1.1.2 在 $10\text{keV}\sim 1.5\text{MeV}$ 的光子能量范围内, 空气比释动能 K_a 与照射量 X 的关系由式(1)确定:

$$K_a = \frac{W}{e} \cdot \frac{1}{1-g} \cdot X \quad (1)$$

式中: W ——在空气中形成一对离子所消耗的平均能量, J(对于干燥空气, W/e 的推荐值为 $33.97\text{J}\cdot\text{C}^{-1}$);

e ——电子电荷, C;

g ——次级带电粒子的能量以韧致辐射形式损失的份额(对于本规程涉及的 X 辐射, $g=0$; 对 $^{60}\text{Co}\gamma$ 辐射, $g=0.3\%$)。

7.1.1.3 空气比释动能率约定真值的扩展不确定度($k=2$)均应不大于10%。

7.1.1.4 个人剂量当量 $H_p(0.07)$ 和 $H_p(10)$ 的约定真值, 可通过空气中同一点的空气比释动能约定真值转换获得, 其转换因子 $F_p(0.07)$ 和 $F_p(10)$ 见表2及附录A; 周围剂量当量 $H^*(10)$ 的约定真值, 可由空气中同一点的空气比释动能约定真值转换获得, 其转换因子 $F^*(10)$ 见表2及附录A。

7.1.2 参考辐射

7.1.2.1 检定所需使用的 X、 γ 参考辐射列于表2。其荧光 X 辐射和连续谱窄谱系列过滤 X 辐射的特性和产生条件见附录C。

表2 检定所用 X、 γ 参考辐射及其相关转换因子

参考辐射	代号	能量/keV	$F_p(0.07)/\text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$	$F_p(10)/\text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$	$F^*(10)/\text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$
过滤 X 辐射 (窄谱)	N-40	33	1.27	1.53	1.18
	N-105	83	1.42	1.81	1.71
	N-120	100	1.61	1.81	1.64
γ 辐射	S	662	—	1.21	1.20
	S	1250	—	1.15	1.16

其中, $F_p(0.07)$ 、 $F_p(10)$ 和 $F^*(10)$ 分别是将空气比释动能转换为个人剂量当量 $H_p(0.07)$ 、 $H_p(10)$ 和周围剂量当量 $H^*(10)$ 的转换因子。

7.1.2.2 在检定点的辐射束应能完全和均匀地照射标准仪器和受检剂量计及其体模, 整个体模范围内的剂量当量率的变化不超过5%。

7.1.2.3 散射辐射对各检定点空气比释动能率的贡献应小于该点的空气比释动能率的5%。

7.1.3 配套设备

7.1.3.1 体模

体模在检定过程中用来模拟人(或其部分)并放置被检剂量计。满足本规程要求的一种合适体模是 ICRU 推荐的用有机玻璃板制成的平板水箱体模, 其外部尺寸为 $30\text{cm}\times 30\text{cm}\times 15\text{cm}$ (高 $\times$ 宽 $\times$ 厚)。

7.1.3.2 定位装置

用于安置标准仪器或受检剂量计, 使其能在一定范围内移动并能精确定位于辐射场中的测量点上。定位情况用光学准直系统观测, 源至剂量计距离用尺或其他测距装置测量。

7.1.3.3 监测电离室

用于监测并修正 X 射线发生器输出量的变化, 推荐使用透过型电离室。在 X 射线发生器输出稳定的条件下可不使用。

7.1.3.4 温度计

测量范围 $0^\circ\text{C}\sim 50^\circ\text{C}$, 最小分度值不大于 0.2°C 。

7.1.3.5 气压计

测量范围至少 86kPa~106kPa, 最小分度值不大于 0.1kPa。

7.1.4 环境条件

检定实验室的环境条件应符合表 3 的要求。

表 3 对实验室环境条件的要求

环 境 参 量	要 求
环境温度	15℃~25℃, 检定过程中变化不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$
相对湿度	$\leq 80\%$
大气压力	86kPa~106kPa
γ 辐射本底	空气比释动能率不大于 $0.25\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$

7.2 检定项目

个人与环境监测用 X、 γ 辐射热释光剂量测量系统的首次检定、后续检定和使用中检验的项目见表 4。

表 4 检定项目一览表

检 定 项 目	首 次 检 定	后 续 检 定	使 用 中 检 验
线性	+	+	+
能量响应	+	-	-
刻度因子	+	+	-
量值检验	+	+	-
注：“+”为应检项目，“-”为可不检项目。			

7.3 检定方法

7.3.1 通用特性

按 6.1 和 6.2 条逐项检查被检热释光剂量测量系统的通用特性, 判断其是否符合相应的要求。

7.3.2 剂量计

7.3.2.1 检定时剂量计的数量应按如下原则来确定, 即必须使每个项目的结果具有 95% 的置信水平。可根据被检热释光剂量计的批稳定性数据并使用附录 D 中的方法进行修正来确定所需剂量计的数量。对于检定时单个剂量计单次测量相对标准偏差预期大于批均匀性标准偏差的项目(如辐照剂量更低或其他因素影响增加其单次测量相对标准偏差), 需要使用合适的学生分布因子来修正其单个剂量计测量标准偏差再来确定其所需剂量计数量。

在符合检测项目置信水平的情况下对所有项目全部使用固定的 10 个剂量计进行检定, 这时相对应的分布因子 $t_n = 2.26$, 详见附录 D 中表 D1。

7.3.2.2 剂量计的放置方法是: 对 P(AII) 热释光系统, 剂量计应放置于体模表面正对射线束方向的一面, 且体模表面下深度为 0.07mm 或 10mm 的一点位置与剂量当量约定

真值已知的检定点位置重合；对 E(AⅡ) 系统，剂量计(包括外套)放置于辐射场中心，其测量有效中心点位置与剂量当量约定真值已知的检定点位置重合。

7.3.3 线性

准备 5 组剂量计，每组的剂量计数量为 10 个，用¹³⁷Cs 或⁶⁰Co 参考辐射按表 5 所列的剂量当量约定真值 C_i 对每组剂量计分别进行辐照，然后读出其评定值，计算每组的平均值 $\bar{E}_i$ 和标准偏差 $s_{\bar{E}_i}$ 。

表 5 各热释光系统线性检定剂量范围

热释光系统	各组的受照剂量约定真值 C_i/mSv				
	1	2	3	4	5
P($7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	0.5	1	10	100	1000
P($1000\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	0.1	1	10	100	1000
E(AⅡ)(7d)	0.01	0.1	1	10	100
E(AⅡ)(30d)	0.03	0.1	1	10	100

应满足：

$$0.90 \leq \frac{\bar{E}_i \pm I_i}{C_i} \leq 1.10 \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (2)$$

式中， $I_i = 2.26s_{\bar{E}_i} / \sqrt{10}$ ，为第 i 组的平均值 $\bar{E}_i$ 的置信区间的半宽度，见附录 D 中的 D.3。其中， C_i 的不确定度被认为可忽略。

7.3.4 能量响应和刻度因子

7.3.4.1 准备 3 组剂量计，每组的剂量计数量为 10 个，将剂量计正确放置在所选的检定点上，从正面对每组剂量计进行辐照。所选用的参考辐射能量按表 6 所列，应从窄谱系列的过滤 X 辐射中选择符合表 6 要求的参考辐射进行这项试验。在无法从窄谱系列中获得所需参考辐射的条件下，也可选用相同能量的宽谱系列参考辐射，所需的转换系数可从 GB/T 12162.3—2004 中获得。应尽量选用相同的剂量当量值进行该项检定。所辐照的剂量当量约定真值 C 为 $1\text{mSv} \sim 10\text{mSv}$ 。然后读出其评定值 E ，并计算每组的平均值 $\bar{E}_i$ 和标准偏差 $s_{\bar{E}_i}$ 。

表 6 参考辐射

组 序 i	辐 射 能 量
1	(30~40)keV 参考辐射
2	(80~100)keV 参考辐射
3	¹³⁷ Cs 或 ⁶⁰ Co

对用于个人监测的 P(AⅡ) 热释光测量系统和用于环境监测的最低能量为 30keV 的 E(30keV)(AⅡ) 系统，应满足：

$$0.70 \leq \frac{\bar{E}_i \pm I_i}{C_i} \leq 1.30 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

对用于环境监测的最低能量为 80keV 的 E(80keV)(A II) 热释光测量系统应满足:

$$\frac{\bar{E}_i \pm I_i}{C_i} \leq 2.0 \quad (i = 1) \quad (4)$$

$$0.70 \leq \frac{\bar{E}_i \pm I_i}{C_i} \leq 1.30 \quad (i = 2, 3) \quad (5)$$

式中, $I_i = 2.26 \cdot s_{\bar{E}_i} / \sqrt{10}$, 为第 i 组的平均值 $\bar{E}_i$ 的置信区间的半宽度, 见附录 D 中的 D.3。其中, C_i 的不确定度被认为可忽略。

7.3.4.2 按下式计算该热释光剂量测量系统对不同能量的刻度因子 K_{fi} :

$$K_{fi} = C_i / \bar{R}_i \quad (6)$$

式中, C_i 为每种能量的剂量当量约定真值, 除本底外, 对应每种能量的剂量计读出值的平均值。

7.3.5 量值检验

对所有的 P(A II) 和 E(A II) 热释光剂量系统, 准备 2 组剂量计, 每组的剂量计数量为 10 个, 将剂量计正确放置在所选的检定能量下(剂量计需放置在体模上), 用剂量当量约定真值为 C_R 的两种参考辐射分别进行辐照, 一种参考辐射为检定线性时用的辐射(^{60}Co 或 ^{137}Cs 的 γ 射线), 另一种选择检定刻度因子的能量; C_R 的量值取为测量范围的 1mSv~10mSv 之间, 然后由受检方根据其线性和刻度因子得出每个剂量计的评定值 E , 并计算每组的平均值 $\bar{E}$ 和相应的标准偏差 $s_{\bar{E}}$ 。

对检定线性所用的辐射, 应满足:

$$0.65 \leq \frac{\bar{E} \pm I}{C} \leq 1.15 \quad (7)$$

对其他能量的辐射, 应满足:

$$0.70 \leq \frac{\bar{E} \pm I}{C_R} \leq 1.30 \quad (8)$$

式中, $I = 2.26 s_{\bar{E}} / \sqrt{10}$, 为组平均值 $\bar{E}$ 的置信区间的半宽度, 见附录 D 中的 D.3。其中, C_R 的不确定度被认为可忽略。

7.4 检定结果的处理

7.4.1 按本规程的规定和要求检定合格的热释光剂量测量系统发给检定证书, 检定不合格的发给检定结果通知书并注明不合格的项目。

7.4.2 检定证书(或检定结果通知书)的格式和内容以及热释光读出值记录反馈表格式见附录 E。

7.5 检定周期

个人和环境监测用热释光剂量测量系统的检定周期一般不超过 1 年。

附录 A

剂量当量转换因子

个人热释光剂量系统应以人体组织内下列深度处的剂量当量进行检定：

—— $7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$

—— $1\,000\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$

在检定时应将剂量计放置于体模上，用能量在 $(0.015\sim 3)\text{MeV}$ 之间的光子辐照。各系统对每种选定能量光子的评定值 E 必须与体模内适当深度处的约定真值 C 比较。

当光子辐射源是以受照体存在时处于电子平衡条件下的空气比释动能 K_a 进行校准，且剂量计是被放置于体模表面进行照射，那么

$$C(7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}) = F(7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}) \times K_a$$

$$C(1\,000\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}) = F(1\,000\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}) \times K_a$$

其中， $F(7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$ 和 $F(1\,000\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$ 是针对两种深度的转换因子。表A1和表A2分别给出了两种个人剂量测量系统($7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $1\,000\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)的，针对一可获得的体模在平行条件下不同入射角度的数值。各辐射条件之间的中间值可用内插法获得。这些数据取自GB/T12137.3—2004。对于表A2和A3中的N-20、N-25、N-30和F-25这几种辐射质，需要注意能量或变化可能对转换系数的值有显著的影响。表A1给出了单能光子空气比释动能的转换因子。表A3给出了各参考辐射空气比释动能的周围剂量当量转换因子。

表 A1 单能平行光子平板体模的剂量当量转换因子 $F_p(0.07)$ 和 $F_p(10)$ 的推荐值

能量 E/MeV	$F_p(0.07) / \text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$	$F_p(10) / \text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$
10	0.95	0.01
12.5	0.96	0.10
15	0.98	0.26
20		0.61
30	1.18	1.11
40	1.29	1.49
50	1.37	1.77
60	1.39	1.89
80	1.38	1.90
100	1.35	1.81
125	1.32	1.70

表 A1 (续)

能量 E/keV	$F_p(0.07) / \text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$	$F_p(10) / \text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$
150	1.28	1.61
200	1.25	1.49
300	1.21	1.37
400	—	1.30
500	—	1.26
600	—	1.23
800	—	1.19
1 000	—	1.17
1 250	—	1.15
1 500	—	1.14
3 000	—	1.12
6 000	—	1.11
10 000	—	1.11

表 A2 不同入射角的平板体模剂量当量转换因子 $F_p(0.07)$ 和 $F_p(10)$ 的推荐值

参考 辐射	代号	适用距离 /m	$F_p(0.07) / \text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$				$F_p(10) / \text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$			
			0°	20°	40°	60°	0°	20°	40°	60°
荧光 X 辐射	F-Zr	1.0~2.0	0.99	0.99	0.99	0.98	0.32	0.30	0.23	0.10
过滤 X 辐射 (窄谱)	N-20	1.0~2.0	0.98	0.98	0.98	0.97	0.27	0.26	0.20	0.09
	N-25	1.0~2.0	1.03	1.03	1.02	1.02	0.55	0.53	0.44	0.28
	N-30	1.0~2.0	1.10	1.10	1.09	1.07	0.79	0.77	0.68	0.49
	N-40	1.0~3.0	1.27	1.26	1.24	1.19	1.17	1.15	1.06	0.85
	N-60	1.0~3.0	1.55	1.54	1.50	1.42	1.65	1.62	1.52	1.27
	N-80	1.0~3.0	1.72	1.70	1.66	1.58	1.88	1.86	1.76	1.56
	N-100	1.0~3.0	1.72	1.70	1.68	1.60	1.88	1.86	1.76	1.53
	N-120	1.0~3.0	1.67	1.66	1.63	1.58	1.81	1.79	1.71	1.51
	N-150	1.0~3.0	1.61	1.60	1.58	1.54	1.73	1.71	1.64	1.46
	N-200	1.0~3.0	1.49	1.49	1.49	1.46	1.57	1.56	1.51	1.38
	N-250	1.0~3.0	1.42	1.42	1.43	1.43	1.48	1.48	1.44	1.33
	N-300	1.0~3.0	1.38	1.38	1.40	1.40	1.42	1.42	1.40	1.30

表 A2 (续)

参考 辐射	代号	适用距离 /m	$F_P(0.07) / \text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$				$F_P(10) / \text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$			
			0°	20°	40°	60°	0°	20°	40°	60°
γ 辐射	S-Am	2.0~3.0	1.72	1.70	1.66	1.57	1.89	1.86	1.77	1.50
	S-Cs	1.5~4.0	—	—	—	—	1.21	1.22	1.22	1.19
	S-Co	1.5~4.0	—	—	—	—	1.15	1.15	1.16	1.14

表 A3 参考辐射的周围剂量当量转换因子 $F^*(10)$ 的推荐值

参 考 辐 射	能量 E/keV	适用距离/m	$F^*(10) / \text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$
F-Zr	15.8	1.0~2.0	0.32
N-25	20	1.0~2.0	0.52
N-30	24	1.0~2.0	0.80
N-40	33	1.0~3.0	1.18
N-60	48	1.0~3.0	1.59
N-80	65	1.0~3.0	1.73
N-100	83	1.0~3.0	1.71
N-120	100	1.0~3.0	1.64
N-150	118	1.0~3.0	1.58
N-200	164	1.0~3.0	1.46
N-250	208	1.0~3.0	1.39
N-300	250	1.0~3.0	1.35
S-Am	59.5	1.0~2.0	1.74
S-Cs	662	1.0~3.0	1.20
S-Co	1 250	1.0~3.0	1.16

附录 B

热释光剂量计和读出仪的性能要求及其测试方法

B.1 热释光剂量计和读出仪的性能要求

热释光剂量计和读出仪的性能要求见表 B1。

表 B1 热释光剂量计和读出仪的性能要求

性能		量值或影响量的量值范围	技术要求
剂量计	批均匀性	$P(AII): 10\text{mGy}$	30 %
	重复性	$P: 10\text{mGy}$ $E(AII)(7d): \mu\text{Gy}$ $E(AII)(30d): \mu\text{Gy}$	5 %
	角响应	$P: 0^\circ \sim 60^\circ, (60 \pm 5)^\circ$ $E: 3 \times 360^\circ, ^{137}\text{Cs} \text{ 或 } ^{60}\text{Co}$	正常入射方向的响应相差不大于 15 % 响应值变化不大于 15 %
读出仪	稳定性	$P(AII) \text{ 和 } E(AI)$	5 %
		168h	10 %

B.2 测量方法

B.2.1 热释光剂量计的批均匀性

将同一批次中的所有剂量计准备, 用 ^{60}Co 或 ^{137}Cs 参考辐射以相同的剂量值(约为 10mGy)辐照, 读出每一个剂量计的评定值 E , 并找出其最大值和最小值 $E_{\max}$ 和 $E_{\min}$, 应满足:

$$\frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\min}} \leq 0.3$$

B.2.2 热释光剂量计的重复性

准备 n 个剂量计, 对用于不同监测系统的剂量计, 按表 B1 中的量值范围, 用 ^{60}Co 或 ^{137}Cs 参考辐射辐照并读出其评定值。并按相同步骤重复 10 次, 每次的剂量值应完全相等。

对每一个剂量计, 可得其评定值 E_{ij} , 其中 i 代表第 i 次辐照, j 代表第 j 个剂量计。对第 i 次辐照, 计算所有剂量计的平均值 $\bar{E}_i$ 和相应的标准偏差 $s_{\bar{E}_i}$ 及其 10 次辐照的总平均值 $\bar{E}$, 应满足:

$$\frac{s_{\bar{E}_i} + I_i}{\bar{E}} \leq 0.075$$

式中, $I_i = t_n \cdot \sqrt{0.5/(n-1)} \cdot s_{\bar{E}_i}$, 为第 i 次辐照的标准偏差 $s_{\bar{E}_i}$ 的置信区间的半宽度, 计算方法见附录 D 中的 D.2 条。

对第 j 个剂量计, 计算 10 次辐照的平均值 $\bar{E}_j$ 和相应的标准偏差 $s_{\bar{E}_j}$ 。亦应满足:

$$\frac{s_{\bar{E}_j} + I_j}{\bar{E}_j} \leq 0.075$$

式中, $I_j = t_{10} \cdot \sqrt{0.5/(10-1)} \cdot s_{\bar{E}_j} = 0.53 \times s_{\bar{E}_j}$, 为第 j 个剂量计的标准偏差 $s_{\bar{E}_j}$ 的置信区间的半宽度, 计算方法见附录 D 中的 D.2 条。

B.2.3 热释光剂量计的人射角响应

B.2.3.1 对所有用于个人监测的 P(A II) 热释光测量系统, 使用 (60 ± 5) keV 的 X 射线或 ^{241}Am 的 γ 射线检定其入射角响应, 准备 4 组剂量计, 每组的剂量计数量为 n 个, 将剂量计正确放置在体模上所选的检定点上, 入射角分别为 0° (正面入射方向)、 20° 、 40° 和 60° , 应在两个不同的平面内改变入射角来进行本项检定, 这两个平面应相互垂直并同时垂直于靠近剂量计区域的体模表面。用剂量当量约定真值为 10mSv 的上述参考辐射分别进行辐照, 然后读出每个剂量计的评定值 E , 并计算每组的平均值 $\bar{E}_i$ 和相应的标准偏差 $s_{\bar{E}_i}$ 。

应满足:

$$0.85 \leq \frac{\sum_{i=1}^4 \bar{E}_i}{4\bar{E}_1} \pm I \leq 1.15 \quad (\text{B1})$$

式中, I 是 $\left(\frac{\sum_{i=1}^4 \bar{E}_i}{4\bar{E}_1} \right)$ 的计算值的置信区间的半宽度, 见附录 D 中的 D.4。

B.2.3.2 对所有用于环境监测的 E(A II) 热释光测量系统, 使用 ^{60}Co 或 ^{137}Cs 的 γ 射线检定其入射角响应, 准备 3 组剂量计, 每组的剂量计数量为 n 个, 将剂量计放置于所需检定点。用剂量当量约定真值 C 为 10mSv 的上述参考辐射分别进行辐照, 在辐照过程中每一组中的每一个剂量计都应以剂量计中心为旋转中心分别绕三个互相垂直的轴线中的一个作均匀转动。然后读出每个剂量计的评定值 E , 并计算每组的平均值 $\bar{E}_i$ 和相应的标准偏差 $s_{\bar{E}_i}$ 。

对每一组, 都应满足:

$$0.85 \leq \frac{\bar{E}_i \pm I_i}{C} \leq 1.15 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (\text{B2})$$

式中, $I_i = t_n \cdot s_{\bar{E}_i} / \sqrt{n}$, 为第 i 组的平均值 $\bar{E}_i$ 的置信区间的半宽度, 见附录 D 中的 D.3。其中, C_i 的不确定度被认为可忽略。

B.2.4 热释光读出仪的稳定性

选取批均匀性和重复性都较好的剂量计, 准备三组, 每组 n 个, 用 ^{60}Co 或 ^{137}Cs 参考辐射以相同的剂量值(约为 10mGy)辐照。将所有剂量计在实验室标准测试条件下贮存两星期, 读出第 1 组剂量计并用其结果来确定其评定因子 F , 然后在相同测试条件下以下列时间间隔读出其余两组剂量计:

——第 2 组: 第 1 组读出后间隔 24h;

——第 3 组: 第 1 组读出后间隔 168h。

用由第 1 组剂量计所获得的评定因子 F 来确定每个剂量计的评定值 E 并计算每组剂量计的平均值 $\bar{E}$ 及其相应的标准偏差。应满足:

$$0.95 \leq \frac{\bar{E}_2}{\bar{E}_1} + I_{21} \leq 1.05$$

$$0.90 \leq \frac{\bar{E}_3}{\bar{E}_1} + I_{31} \leq 1.10$$

其中, I 是相应两个 $\bar{E}$ 的比值的置信区间的半宽度, 计算方法见附录 D 中的 D.4 条。

附录 C

X 参考辐射的特性和产生条件

C.1 过滤 X 参考辐射的特性以及产生这些辐射所使用的高压和过滤条件列于表 C1。表中的管电压是在负载条件下测得的, 附加过滤和固定过滤组成总过滤。对于 12keV、16keV、20keV 和 24keV 这四个平均能量最低的辐射, 固定过滤由推荐的射线管固有过滤 1mmBe (也可使用其他值) 构成。对于其他能量的辐射, 固定过滤在 40kV 条件以上时调整到 4mmAl。半值层是在距焦斑 1m 处测量的。检定实验室应通过测谱法或半值层法证实所使用的过滤 X 辐射质与表 A2 的一致性。

表 C1 窄谱系列过滤 X 参考辐射

平均能量 /keV	分辨率 /%	管电压 /kV	附加过滤/mm				第一半值层 /mm	第二半值层 /mm
			Pb	Sn	Cu	Al		
12	33	15	0	0	0	0.5	0.14 Al	0.16 Al
16	34	20	0	0	0	1.0	0.32 Al	0.37 Al
20	33	25	0	0	0	2.0	0.66 Al	0.73 Al
24	32	30	0	0	0	4.0	1.15 Al	1.30 Al
33	30	40	0	0	0.21	0	0.084 Cu	0.091 Cu
48	36	60	0	0	0.6	0	0.24 Cu	0.26 Cu
65	32	80	0	0	2.0	0	0.58 Cu	0.62 Cu
83	28	100	0	0	5.0	0	1.11 Cu	1.17 Cu
100	27	120	0	1.0	5.0	0	1.71 Cu	1.77 Cu
118	37	150	0	2.5	0	0	2.36 Cu	2.47 Cu
164	30	200	1.0	3.0	2.0	0	3.99 Cu	4.05 Cu
208	28	250	3.0	2.0	0	0	5.19 Cu	5.23 Cu
250	27	300	5.0	3.0	0	0	6.12 Cu	6.15 Cu

C.2 荧光 X 参考辐射是某些材料发出的 K 荧光辐射。作为一级近似, 其谱线是由 $K_{\alpha 1}$ 给出的。利用 K 吸收缘介于 K 和 K_{β} 之间的次级过滤器, 可使 K_{β} 的贡献小到忽略不计。有两组可供选择的荧光 X 参考辐射, 第一组由序号 1~10 的 10 种辐射组成, 第二组已含序号 11~15 和 8~10 种的 8 种辐射。

表 C2 荧光 X 参考辐射

序号	理论能量 K_{α}/keV	辐射体			管电 压/kV	总初级过滤	次级过滤	
		元素	推荐的 化学形态	质量厚度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$		最小质量厚 度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	化学形态	面质量厚度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
1	9.89	锆	GeO_2	0.180	60	Al 0.135	GdO	0.020
2	15.8	锆	Zr	0.180	80	Al 0.27	SrCO_3	0.053
3	23.2	镉	Cd	0.150	100	Al 0.27	Ag	0.053
4	31.0	铯	Cs_2SO_4	0.190	100	Al 0.27	TeO_2	0.132
5	40.1	钐	Sm_2O_3	0.175	120	Al 0.27	CeO_2	0.195
6	49.1	铒	Er_2O_3	0.230	120	Al 0.27	Gd_2O_3	0.263
7	59.3	钨	W	0.600	170	Al 0.27	Yb_2O_3	0.358
8	68.8	金	Au	0.600	170	Al 0.27	W	0.433
9	75.0	铅	Pb	0.700	190	Al 0.27	Au	0.476
10	98.4	铀	U	0.800	210	Al 0.27	Th	0.476
11	17.5	钼	Mo	0.150	80	Al 0.27	Zr	0.035
12	25.3	锡	Sn	0.150	100	Al 0.27	Ag	0.071
13	37.4	钕	Nd	0.150	110	Al 0.27	Ce	0.132
14	49.1	铒	Er	0.200	120	Al 0.27	Gd	0.233
15	59.3	钨	W	0.600	170	Al 0.27	Yb	0.322

附录 D

置信界限

D.1 概述

如果测量值随机不确定度的大小构成该测量值允许误差的重要部分,则必须考虑以多次测量方法处理随机不确定度。测量次数或样品多少应当这样选择:使检定中具有95%置信度的每个平均值 $\bar{X}$ 的置信区间或处于测量误差允许限度以内(该项目检定通过,如图D1中 $\triangle$ 点)或处于该限度以外(该项目检定不通过,如图中 $\circ$ 点)。若误差允许限度之一, $\bar{X}_0$ 或 $\bar{X}_1$,处于平均值置信区间之中(如图中 $\square$ 点),则必须增加测量次数或增加样品数量以降低平均值 $\bar{X}$ 的置信区间宽度 $2I$,使达到上述两种情况之一,以便明确判断检定是否通过。

在每个检定项目中,推荐对每个剂量计先做10次测量。如必须降低实验标准误差置信区间宽度 $2I$,则应增加测量次数。

有时,可采用一种方便的方法完成一项检测,即从一批产品中随机抽取一定数量的剂量计来测量,以代替用同一剂量计做重复测量。这种方法诚可使用,但可能增加检验结果的随机不确定度。

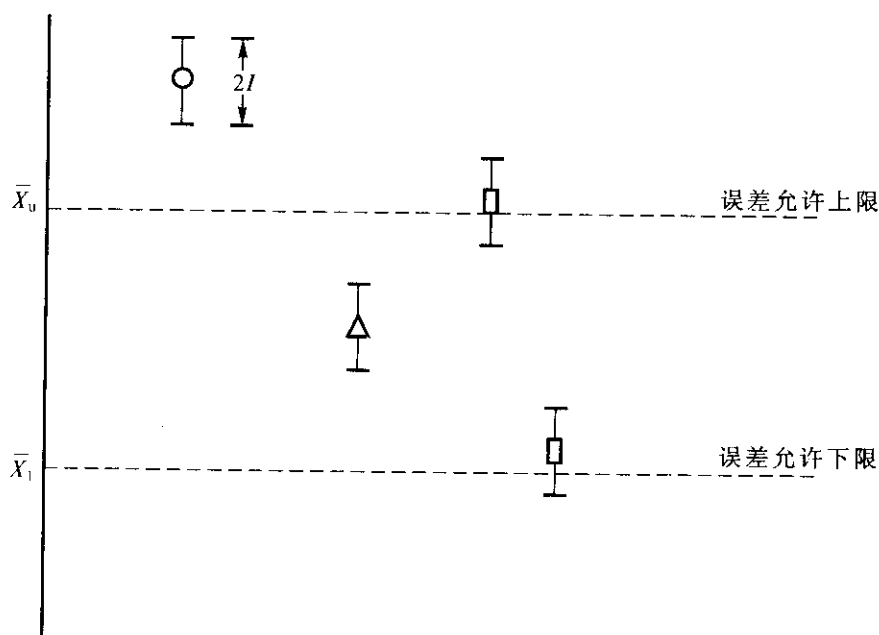


图 D1 若围绕 $\bar{X}$,宽度为 $2I$ 的置信区间处于允许误差上、下限($\bar{X}_0$, $\bar{X}_1$)之间,

即 $\bar{X}_1 + I \leq \bar{X} \leq \bar{X}_0 - I$,则检定通过

D.2 置信区间

D.2.1 实验标准偏差(s)的置信区间

实验平均值标准偏差(s)的置信区间是

$$(s - I_s, s + I_s)$$

其中, I_s 是 s 的置信区间半宽度。若 s 是从 n 次测量中算出, 则具有 95% 置信度的 I_s 上限可按下式计算:

$$I_s = t_n \cdot \sqrt{\frac{0.5}{n-1}} \cdot s$$

例如, 对于 10 个剂量计, 则 $I_s = 0.53s$ 。

D.2.2 平均值($\bar{X}$)的置信区间

平均值($\bar{X}$)的置信区间是

$$(\bar{X} - I, \bar{X} + I)$$

其中, I 是一组测量值的平均值 $\bar{X}$ 的置信区间半宽度, 若从 n 次测量中计算 $\bar{X}$, 则置信区间半宽度:

$$I = t_n \cdot s / \sqrt{n}$$

式中, s 是该组测量的标准偏差; t_n 按表 D1 取值。例如, 测量次数为 $n = 10$, 则

$$I = 2.26 \cdot s / \sqrt{10} = 0.71s$$

表 D1 学生分布因子

n	t_n
2	12.71
3	4.30
4	3.18
5	2.78
6	2.57
7	2.45
8	2.37
9	2.31
10	2.26
15	2.15
20	2.09
25	2.06
30	2.05
40	2.02
60	2.00
120	1.98
∞	1.96

D.2.3 复合量的置信区间

若量 $\bar{X}$ 是由若干个独立平均值 $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_k$ 算得

$$\bar{X} = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_k)$$

而第 i 个平均值 ($\bar{X}_i$) 的置信区间半宽度为 I_i , 则 $\bar{X}$ 的置信区间半宽度 I 由下式给出:

$$I = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left[\frac{\partial f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_k)}{\partial \bar{X}_i} \cdot I_i \right]^2}$$

例如:

a) $\bar{X} = \bar{X}_1 \pm \bar{X}_2$, 则 $I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2}$

通常 $\bar{X} = \sum_{i=1}^k \bar{X}_i$, 则 $I = \sqrt{\sum_{i=1}^k I_i^2}$

b) $\bar{X} = \frac{\bar{X}_1}{\bar{X}_2}$, 则 $I = \frac{\bar{X}_1}{\bar{X}_2} \cdot \sqrt{\left(\frac{I_1}{\bar{X}_1}\right)^2 + \left(\frac{I_2}{\bar{X}_2}\right)^2}$

c) $\bar{X} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\bar{X}_1 + \bar{X}_2}$, 则 $I = \frac{2}{(\bar{X}_1 + \bar{X}_2)^2} \cdot \sqrt{(\bar{X}_1 \cdot I_2)^2 + (\bar{X}_2 \cdot I_1)^2}$

检定证书（内页）格式

E.1 检定证书(或检定结果通知书)内页格式及应包括的内容推荐如下:

1. 所用计量标准	名称、型号、编号和有效证书等		
2. 检定时的参考辐射和相关参数	辐射源/ kV、mA 值、过滤条件、HVL、剂量率等		
3. 检定时的环境条件	温度、气压、湿度等		
4. 检定结果	TLD 系统的类型（环境、个人）		
	①线性	最大非线性偏差	辐照所用的剂量当量率范围
	②能量响应和刻度因子	能量响应最大偏差 各能量的刻度因子	各检定点的能量
	③量值检验	检验值的偏差	量值检验的能量和剂量
	④		
5. 检定结论	合格（或不合格以及不合格的项目）		

E.2 热释光读出值记录反馈表格式和内容推荐如下:

编号	能量	剂量	读 出 值									