

辐射防护监测技术汇编

中国科学院原子能研究所



原子能出版社

辐射防护监测技术汇编

中国科学院原子能研究所

原子能出版社

前言

伟大的领袖和导师毛主席教导我们：“在实施增产节约的同时，必须注意职工的安全、健康和必不可少的福利事业。”党和国家发布了一系列保护职工安全和健康的具体政策，制定了环境保护的方针“全面规划，合理布局，综合利用，化害为利，依靠群众，大家动手，保护环境，造福人民。”我所辐射防护监测技术，在毛主席无产阶级革命路线指引下，自力更生，从无到有，建立了一套初步适应我所辐射防护工作要求的监测技术。为了使这些辐射监测技术更好的为无产阶级政治服务，为科研生产和辐射防护工作服务，现把已有的辐射防护监测技术编写成册，供从事辐射防护工作的人员使用及有关人员参考。

辐射防护监测技术是辐射防护和核环境学的重要组成部分。它是一门综合性较强的、较为复杂的测量技术。其特点是：

(1) 测量方法的灵敏度高、量程范围宽。由于辐射的最大容许标准很小，加上辐射对人产生危害的机理至今尚未完全弄清；这就要求工作人员尽量避免一切不必要的照射，并尽可能减少对环境的污染。因此，辐射防护监测方法的灵敏度应尽可能高。例如：对 γ 剂量监测，环境 γ 监测要求：累积剂量约1毫雷姆，剂量率约1微雷姆/小时。考虑到事故监测，则要求累积剂量测量上限大于 10^3 雷姆，剂量率约 10^3 雷姆/小时。对 β 、 γ 放射性强度的测量，要求测量到 10^{-12} — 10^{-13} 居里。对 α 放射性强度的测量，要求测量到 10^{-13} — 10^{-14} 居里。

(2) 测量分析的对象较复杂。就介质而言，包括水、空气、土壤、动植物和人体排泄物等，即整个生物界。由于测量对象复杂，干扰杂质较多，这就使得辐射防护监测技术中的放化分析工作较一般放化分析要复杂。就同位素而言，几乎所有同位素都可能遇到。

(3) 测量的工作量较大，重复性工作较多，这就使得有必要而且又有可能在辐射防护监测技术中大量采用自动测量技术。

辐射防护监测技术是辐射防护工作的耳目，是检查一个原子能企业的安全生产状况和三废治理措施是否符合国家规定的重要手段。其内容包括：个人剂量监测、现场监测和环境监测。辐射对人造成的照射可分：内照射和外照射。个人剂量监测的目的是：测定工作人员（或居民）所受实际内外照射，为防护评价和改善防护条件提供依据。放射性物质对人产生照射通常都是通过水、空气和生物等传播的。因此，有必要对空气、水和生物中放射性污染进行经常的监测。由于放射性物质在空气中、水中和体内的最大容许量一般都很低，所以弱放射性样品的测量和分析在辐射防护监测技术中占重要地位。近年来，弱放射性样品的物理分析技术有了较大的进展，但仍然远远不能满足辐射防护工作的需要。弱放射性样品的分析主要还是依靠放化分析，环境和生物样品的放化分析技术已发展成为放化分析的一个分支。剂量基准和剂量仪表的刻度则是保证测量数据可靠性的基础。在存在发生临界事故可能性的单位，建立临界事故监测技术是必要的。

辐射防护监测包括监测技术和方法两部分。监测技术系指具体的测量仪器和分析技术等。监测方法则指如何利用监测技术达到有效的监测的方法，如环境监测点、周期和监测对象的选择等。只注意监测技术，忽视监测方法是达不到有效监测目的的。本书内容仅限

于监测技术。而且仅就辐射防护监测技术来说，内容也是不全的，有不少重要的监测技术在书中均没有提到，如环境 γ 本底监测、人体计数器等。就已经叙述的方面说，内容也是不很完整的。这些都有待在今后的工作中，不断完善与补充。

目 录

第一章 外照射个人剂量	1
第一节 β - γ 胶片剂量计	1
第二节 用核乳胶测量快中子个人剂量	7
第三节 荧光玻璃个人剂量计	12
第四节 固体径迹中子个人剂量计	18
第二章 超临界事故剂量的测量	26
第一节 超临界事故个人中子剂量计	27
第二节 从人体钠活化测量估算中子剂量	34
第三节 利用人体毛发 $^{32}\text{S}(\text{n}, \text{p})^{32}\text{P}$ 反应测定快中子剂量	48
第四节 事故剂量测量方法进展概况	54
第三章 低放射性强度测量和分析技术	59
第一节 低放射性强度测量和分析的一般知识	59
第二节 低放射性强度 α 射线的测量	63
第三节 低放射性强度 β 射线的测量	68
第四节 低放射性强度 γ 射线的测量与分析	79
第四章 放射性气溶胶污染的监测	87
第一节 放射性气溶胶的流动取样设备、技术及其衰变测定法	87
第二节 用 C_{α}/C_{β} 比值法快速鉴别空气中人工放射性污染	95
第三节 假符合 α 气溶胶快速测量方法	99
第四节 用半导体探测器及微孔滤纸测量 α 气溶胶方法	103
第五章 放射性气体的监测方法	112
第一节 空气中氡监测仪	112
第二节 硅胶吸附法测量空气中氡——直接测量法	115
第三节 放射性 ^{131}I 的监测	120
第六章 水中放射性的监测	128
第一节 环境水中总 β 放射性的监测方法	128
第二节 工业废水中总 β 连续测量	132
第三节 重水堆二回路水中的 γ 放射性的监测方法	139
第七章 剂量测量	145
第一节 空腔电离室	145
第二节 测量快中子吸收剂量的乙烯-聚乙烯正比计数器	160
第三节 $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ 热释光剂量计	166
第八章 辐射防护仪表的刻度	173
第一节 γ 剂量仪表的能量响应	173
第二节 β 监测仪表的刻度	183
第三节 测量 ^{41}Ar 电离室的标定	227
第四节 γ 辐射的反散射测定	229

第九章 环境和生物样品中的化学分析方法	237
第一节 总 β 放射性的分析	238
第二节 用双道液体闪烁计数器测量尿中氚	243
第三节 水、土壤和生物样品中放射性铯的测定	246
第四节 环境水中 ^{106}Ru 的分析	252
第五节 环境水和尿中 ^{137}Cs 的分析概要	258
第六节 空气和尿、头发、水中 ^{210}Po 的分析	265
第七节 尿中钍的测定	271
第八节 空气中和尿中铀的荧光分析	274
第九节 尿中镭-226的测定	280
第十节 空气和尿中钋的测定	285
第十章 其它监测方法	295
第一节 密封镭源氢气泄漏的监测方法	295

第一章 外照射个人剂量

外照射个人剂量监测是辐射防护监测的重要方面。其主要目的是通过估测常规个人所受剂量与相应最大容许剂量的比较,来检验是否遵从国家和部门的辐射防护规定;估测事故个人剂量。个人剂量数据可用于评价工作区的辐射安全,改进防护设备和操作方法,以减少个人所受的照射;快速而可靠地确定事故剂量,对于及时准确地诊断放射病和进行医学处理有重要价值;累积的个人剂量数据是研究辐射对人的危害以及制订和修改防护规定的参考资料。

监测包括测量和对测量结果的解释。在某种意义上说解释要比测量更困难些。因而为了更好地监测,在制定个人剂量监测方案时,应包括与监测目的,范围,对象等相关的解释的根据,规定记录的内容、方法、保持和破除的方法,并定期修定。

在外照射剂量相当高时,在近期才能有明显的临床症状,因而个人剂量测量在辐射防护中起着重要作用。

个人剂量监测可分为物理个人剂量监测(以后简称个人剂量监测)和生物个人剂量监测。基于电离辐射在被照个体中产生的生物响应是理想的监测方法,但到目前为止,生物个人剂量监测方法还不能在常规监测中应用,因为:(1)和所推荐的防护标准相比,可观察的响应的剂量阈太高(5—10 拉德);(2)个体之间响应的大小可变,为说明数据必须采用分析的统计方法;(3)非特异性,观察到的响应可以由非辐射的原因产生。其中染色体畸变数的测量对常规职业照射的估计,有某些希望,但用于个人剂量监测将依赖于染色体分析自动化技术的发展。

因此,虽然某些生物监测方法能用于估算事故剂量,但在辐射防护中遇到的长时间小剂量测量还要靠更灵敏和特殊的物理监测方法。

近年来 α 、 β 个人剂量测量方法的发展很快,各种类型的固体剂量计相继出现。其中玻璃剂量计和热释光剂量计被广泛地应用并取得许多实际经验。热释电子,光释电子,光释发光的研究工作正在开展,还有人在探索热激电导辐射剂量计。这些新方法和元件的研究的特点和趋势是提高灵敏度、扩大量程以便更好地适应常规和事故个人剂量监测;减小能量响应、方向性和对环境的影响以便提高测量的准确度。对于中子个人剂量计,近年来,虽已作了较广泛的研究,但至今还没有找到一种较理想的方法。本章只介绍我们在个人剂量监测中采用的和研究过的几种方法: β - γ 胶片剂量计;用核乳胶测量快中子个人剂量;荧光玻璃个人剂量计;固体径迹中子个人剂量计。以下分别介绍。

第一节 β - γ 胶片剂量计

近年来,胶片测个人剂量的方法有被取代的趋势。我们认为各种监测方法对各种不同的场合有其特殊的作用。在必要时可用几种方法配合使用,相互比较,对监测结果作出合理的解释。胶片测量个人剂量的优点是:长期保持原始记录(假如暗室处理后的胶片水洗充分,使每平方英寸的胶膜内大苏达含量减少到0.1毫克,在普通的储存条件下,胶片密度保持几年不变;若水洗彻底,使大苏达含量减少到每平方英寸0.01—0.03毫克,则可在好的储存条件下,胶片密度长期不变^[1])。经过适当设计的胶片个人剂量计可提供几种类型辐射的分布以及用以区分表面和深度效应的有效能量的数据。其次是价格便宜,容易采

用。我们已在实际监测中使用本文将要介绍的剂量计。实践表明，它在一定程度上能满足常规监测的需要。

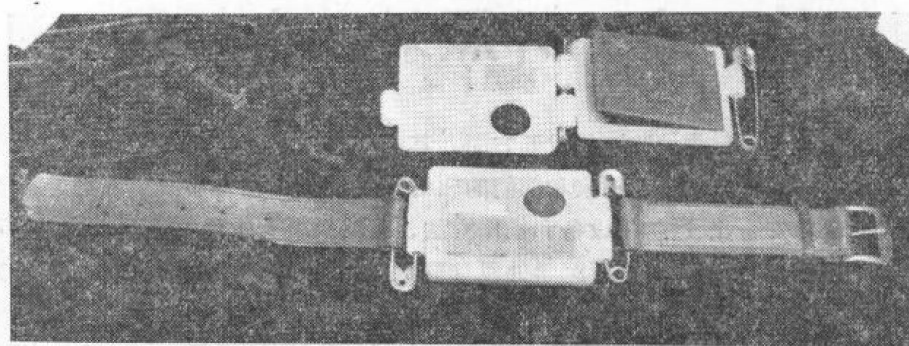


图 1 β - γ 胶片剂量计

关于胶片对 β 射线灵敏度方面的报道很多^[2,3]但因胶片的灵敏度与胶片本身的成分、厚度等许多因素有关，所以不能直接应用现成的结果，本文叙述了采用上海牌 4 F 型胶片的实验结果。通过实验我们设计了四窗 β - γ 胶片剂量计^[4]（见图 1）。主体为白色塑料（改性聚苯乙烯塑料）盒。底和盖用别针铰连，可带在胸前或帽上，也可配表带戴在腕部。剂量计尺寸 $4.5 \times 3.5 \times 0.7$ 厘米。装胶片后的总重量为 12 克。

（一）实 验 方 法

1. β 平面源的制备和刻度

实验所用 β 射线源列在表 1 中。其中 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 源是 150 平方厘米的大面积源；天然铀源是直径为 6 厘米的圆形扁片； ^{32}P 和 ^{204}Tl 源是直径为 5 厘米的自制的圆形平面源。我们采用滤纸吸附法制源。即将厚 8 毫克/厘米² 的色层滤纸（杭州新华造纸厂产品）浸在配制好的一定比放射性溶液中。取出后放在水平玻璃板上晾干，放于铝托盘中，上盖厚为 2.6 毫克/厘米² 的表面保护铝箔进行封装。将胶片贴在表面照射，然后用扫描法测胶片密度来选择比较均匀的 β 源。所用 β 源及其基本特性列入表 1 中。

表 1 所用 β 放射源及其基本特性

源	半 衰 期	最大能量, 兆电子伏	平均能量, 兆电子伏
^{204}Tl	4.3 年	0.77	0.247
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	28 年		
^{90}Sr		0.53	0.188
^{90}Y		2.26	0.897
^{32}P	14.3 天	1.71	0.68
天然铀		2.32	

为了确保在作吸收曲线的实验中，改变吸收片厚度时胶片与源的距离保持不变，把胶片的照射位置选在离源 2 厘米处，从而也改善了照射的均匀性。

全部 β 源的表面和距 2 厘米处的剂量率是用外推电离室^[5]刻度的。

2. 胶片的处理和测量

本实验采用的上海牌 4 F 型胶片的乳剂层厚度是用灵敏度 0.1 毫克的天平进行称量计算的。乳剂层厚 4 毫克/厘米²左右, 片基厚约为 25 毫克/厘米²。胶片显影和定影完全按照厂家的规定配方和条件进行。只是在显影前将胶片在清水中浸湿, 显影后立刻在稀醋酸中抑制约半分钟左右, 然后再定影。经过暗室处理后的胶片密度是在精度为 ± 0.02 密度单位的光电密度计上测量的, 每片测五个点求平均值。当实验中胶片的密度超过密度计的最大测量范围 (3.00) 时采用了双面分测法: 即将胶片两面相错地各刮掉一小面积的乳剂层, 分别测其密度, 将两密度值相加后减去片基的密度读数即得此胶片的密度值。暗室处理和密度测量全过程的标准偏差 (以 ^{60}Co γ 源为标准) 当剂量为 0.05 伦时达 $\pm 10\%$; 当剂量超过 0.10 伦时, $\leq \pm 7\%$ 。

由于暗室处理条件对剂量与密度的关系的影响难以控制, 因而不宜用密度作直接比较, 每次测得的密度值都在同批处理的胶片的标准曲线 (用铀作标准源) 上转换成当量铀剂量 (拉德) 或称表观剂量。

(二) 实 验 结 果

1. 胶片的特性曲线

胶片的特性曲线即被显影胶片密度与曝光之间的关系。在剂量测量中, 曝光用拉德或伦来度量。我们用 ^{60}Co γ 射线源作了上海牌 4 F 型胶片的特性曲线, 示于图 2 中。由图看到此胶片的最低参考曝光 (超过灰雾本底 0.05 的密度所对应的曝光剂量值) 为 0.05 伦。其线性范围 (也是测量范围) 为 0.05—15 伦。

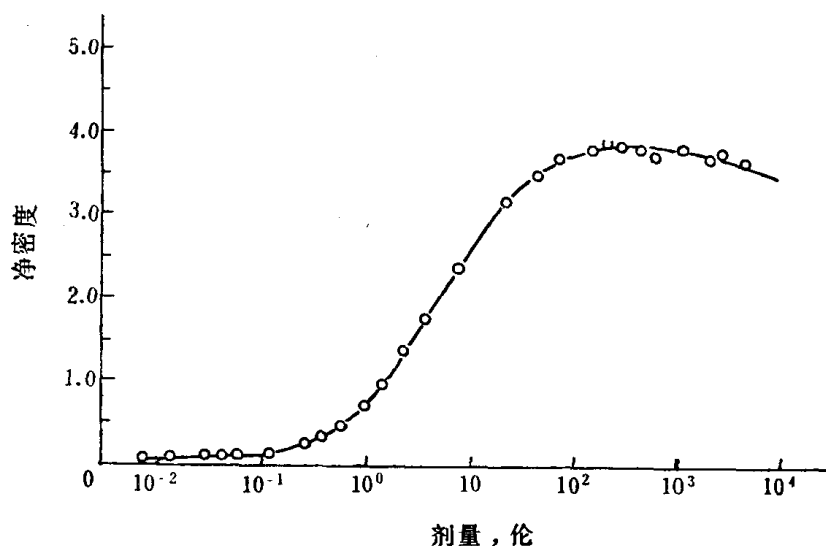


图 2 上海牌 4 F 型胶片对 ^{60}Co γ 射线的特性曲线

特定型号的胶片, 在一定显影条件下, 特性曲线的形状实际上和 γ 或 β 射线的能量无关, 但其沿剂量坐标轴的位置则随能量而移动, 即灵敏度随能量而变。因而可随意选择适当的 γ 或 β 源进行刻度胶片的照射。

2. 胶片对 β 射线的相对灵敏度

胶片对 β 射线的相对灵敏度是产生一定密度所需 β 射线剂量的倒数。在同样条件下, 对同种型号的胶片, 其灵敏度和 β 射线的能量有关, 这就是胶片对 β 射线的能量响应。为了确定相对灵敏度, 首先要做几种 β 射线在组织等效物质中的吸收曲线。吸收材料用塑料片。结果示于图 3 中。图中厚度只是吸收片厚度, 不包括胶片外包 16 毫克/厘米² 黑纸

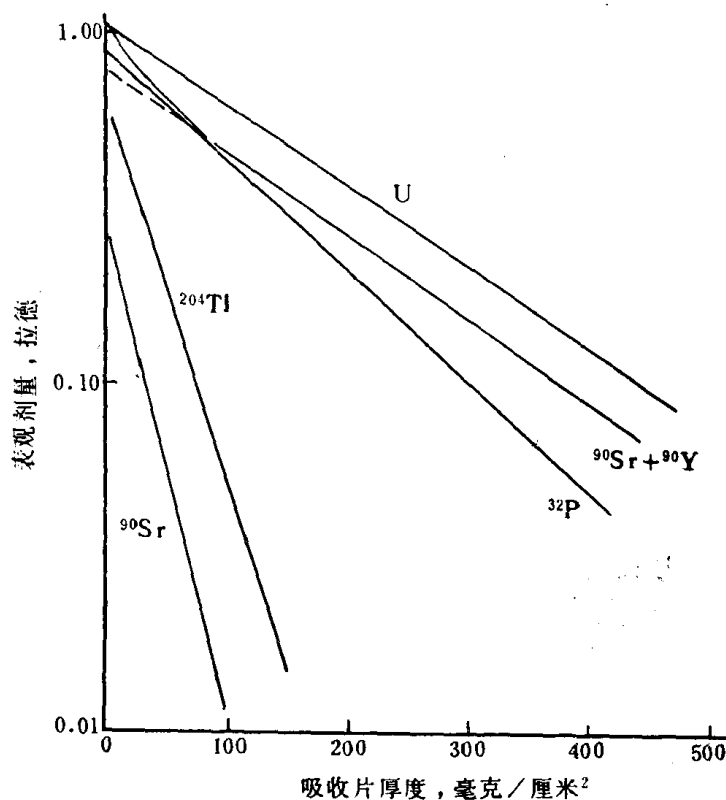


图 3 各种 β 源在塑料中的吸收曲线

的厚度。除 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 之外, 胶片对其他几种 β 源的相对灵敏度很容易求出。即在铀源照射后的胶片特性曲线(标准曲线)上直接查出各源每单位剂量(拉德)所相应的当量铀剂量。 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 源的胶片灵敏度是这样求的: 分别对胶片和外推电离室做出塑料中的吸收曲线。在两吸收曲线图上将 ^{90}Sr 和 ^{90}Y 分开即可求得。结果列于表 2 中。

表 2 胶片对 β 射线的相对灵敏度

源	最大能量, 兆电子伏	相 对 灵 敏 度
^{90}Sr	0.53	0.405
^{204}Tl	0.77	0.580
^{32}P	1.71	0.910
^{90}Y	2.26	1.00
天然铀	2.32	1.00

3. 胶片对 X 和 γ 射线的能量响应

用胶片做个人剂量监测时, 由于它对 X 和 γ 射线的能量响应很大(对 40 千电子伏 X 射线的灵敏度相当于 ^{60}Co γ 射线的十几倍), 而现场的 γ 射线能量比较复杂而且往往伴有 β 射线, 如果忽视胶片对 X 和 γ 射线的能量响应, 则监测数据的误差可能很大。因此必须

表 3 X 射线有效能量

电 压, 千 伏	过滤材料和厚度, 毫米	电 流, 毫 安	半价层, 毫米 ΔCu	有效能量, 千电子伏
60			0.06	28.0
80	0.5 Cu+1.0 Al	10	0.33	52.6
100	1.0 Cu+1.0 Al	10	0.60	67.0
120	1.5 Cu+1.0 Al	10	0.86	77.6
140	1.5 Cu+1.0 Al	8	1.10	84.4
160	1.5 Cu+1.0 Al	5	1.38	97.8
180	1.5 Cu+1.0 Al	5	1.57	103.5
200	1.5 Cu+1.0 Al	5	1.92	117.1
380	2.0 Cu+1.0 Al	3.5	3.51	172.4

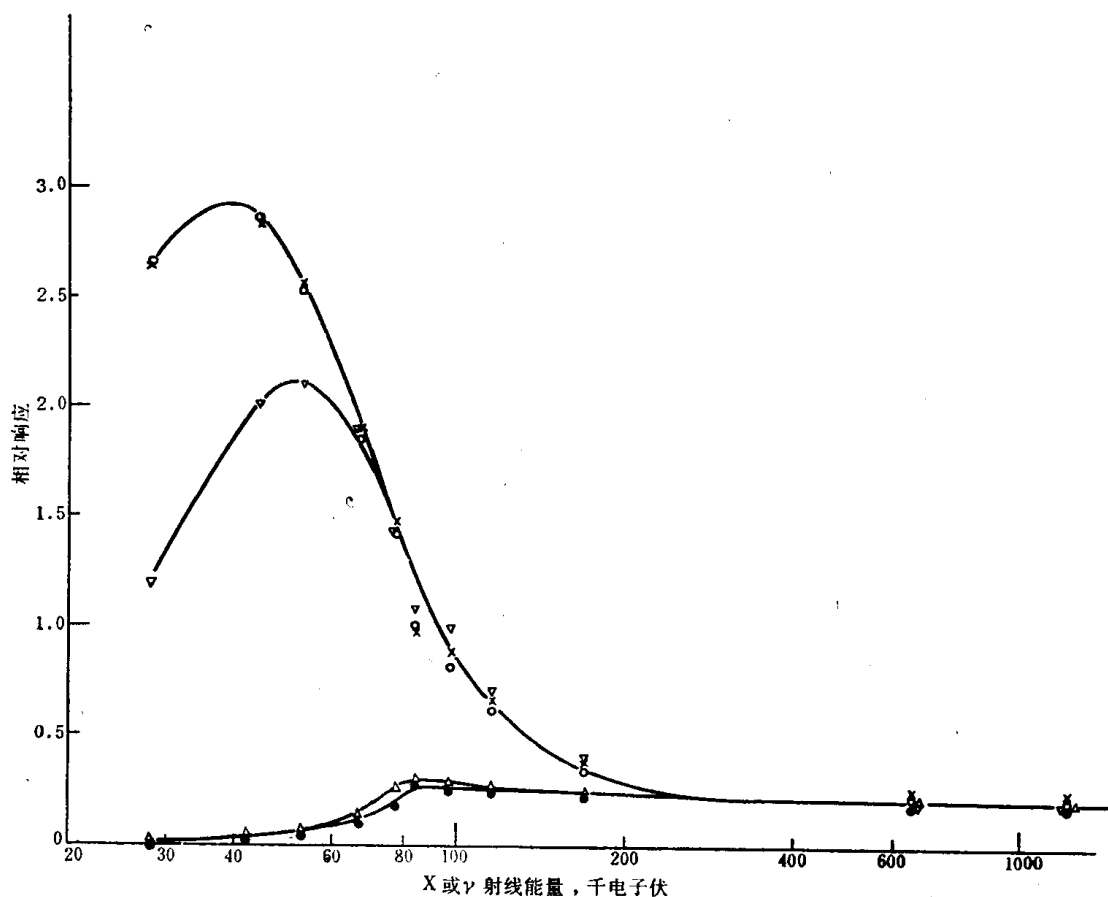


图 4 上海牌 4F 型胶片对 X, γ 射线的能量响应曲线

- 开窗;
- ×——50 毫克/厘米² 塑料;
- ▽——300 毫克/厘米² 塑料;
- △——1.0 毫米锡;
- 1.0 毫米铅。

对胶片进行 X 和 γ 射线的能量响应实验,以便选择一组合适的过滤片以获得辐射场有效能量的数据,或者选择一种过滤条件,使得胶片响应和能量无关。

我们用几种过滤片厚度和几种材料对表 3 中的各种能量的 X 射线, ^{60}Co 和 ^{137}Cs γ 射线做了胶片对 X 和 γ 射线的能量响应实验。

实验结果示于图 4。由图可见在 0.07 兆电子伏以上,在开窗、50 毫克/厘米² 和 300 毫克/厘米² 的塑料过滤片下胶片的相对响应一样,因此在 β - γ 辐射场中任两窗下胶片的表观剂量之差,只表示 β 响应, γ 则由于相减而被扣除。锡过滤片下胶片响应与能量无关,而锡片又基本能吸收掉 β 射线。为方便起见,用锡片下胶片的响应来确定 γ 剂量。

(三) 剂 量 估 算

根据以上的实验结果,我们设计了四窗的 β - γ 胶片剂量计(胶片外包 16 毫克/厘米² 黑纸)。

(1) 开窗:无任何过滤片的圆孔(直径 12 毫米)。记录能贯穿黑纸的 β 、 γ 辐射。

(2) 薄塑料窗:50 毫克/厘米² 的塑料过滤片。对光子的响应与开窗相同,对 β 的响应有依赖于能量的减弱。

(3) 厚塑料窗:为 300 毫克/厘米² 的厚塑料过滤片。除低能光子之外,对 0.07 兆电子伏以上的光子的吸收可以忽略不计。除高能 β 之外,全部低能 β 都能吸收。

(4) 锡窗:是厚 1 毫米的锡片。对 0.07 兆电子伏以上的 X 和 γ 射线响应几乎和能量无关。

剂量的估计方法如下:先将各窗下胶片的黑度在铀- β 特性曲线上查出相应的表观剂量(即当量铀 β -拉德)。利用锡窗下胶片相应的表观剂量 D_{Sn} 可得 γ 剂量 D_{γ} :

$$D_{\gamma} = D_{\text{Sn}} \times 1.15 \text{ 伦} \quad (1)$$

其中 1.15 常数是通过胶片用镭源和铀源照射所得的实验换算值。

利用开窗和厚塑料窗下胶片的表观剂量之差 $D_0 - D_{300}$ 可求 β 剂量:

$$D_{\beta} = (D_0 - D_{300}) \times C \quad (2)$$

其中 C 是修正系数。在此假设 $D_0 - D_{300}$ 仅仅与 β 辐射有关, X 和 γ 的影响都可由于相减而扣除。实际上由于厚塑料不能全部吸收高能 β 辐射,相减的过程也减掉了一部分 β 的响应。这是修正的一个原因;另一方面是由于采用了铀当量剂量,这是修正的另一原因。系数 C 和能量相关,因而和比值 $(D_0 - D_{300}) / (D_{50} - D_{300})$ 相关。其关系如图 5 和表 4。其中 D_{50} 是薄塑料窗下胶片的表观剂量。如果标准源不用铀而用镭源时则修正系数不是 C 而是 B 。此时

$$D_{\gamma} = D_{\text{Sn}} \quad (3)$$

$$D_{\beta} = (D_0 - D_{300}) \times B \quad (4)$$

B 值也在表 4 中。

如预先知道 β 射线能量,则可根据相对灵敏度值,由开窗的胶片密度读数来确定该射线的剂量。

上述胶片剂量计对 0.07—1.25 兆电子伏的 X 和 γ 射线以及对 0.5—2.3 兆电子伏的 β 剂量估计是满意的。超过此范围,由于没有实验数据,误差会增加。在 0.07 以下的 γ 射

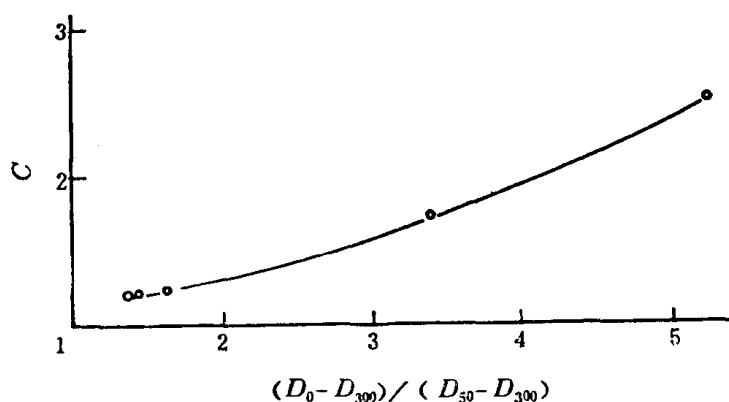


图 5 修正系数 C 值与比值 $(D_0 - D_{300}) / (D_{50} - D_{300})$ 之间的关系曲线

表 4 对应各种 β 能量的修正系数 C 和 B

源	能量, 兆电子伏	$(D_0 - D_{300}) / (D_{50} - D_{300})$	C	B
^{90}Sr	0.53	5.28	2.47	2.15
^{204}Tl	0.77	3.52	1.73	1.50
^{32}P	1.71	1.71	1.22	1.06
^{90}Y	2.26	1.42	1.19	1.04
天然铀	2.32	1.40	1.19	1.04

线在锡片中有较大的吸收而造成了低能 X 射线剂量的低估；然而低能 X 射线在厚塑料中也有相当地减弱因而会误将其当成 β 射线而被记录下来，造成了 β 剂量的过高估计。

第二节 用核乳胶测量快中子个人剂量^[6]

在原子能企业和科学研究机构中，工作人员在反应堆、加速器以及生产中子源等场所工作时，常常受到快中子、慢中子和 γ 射线的照射。在这些混合辐射场中，有时快中子剂量贡献占主要成分。因此进行快中子个人剂量的监测是非常必要的。

目前，在快中子个人剂量监测中，核乳胶法仍然是广泛采用的方法。由核乳胶组成的快中子个人剂量计具有灵敏度较高，能较长期地保存原始数据，体积小、重量轻和携带方便等优点。但是在高温高湿环境中，潜象衰退比较严重，观察核乳胶径迹时很费时间，很劳累，这是它的主要缺点。

在这里，我们将叙述在不同包装形式下，国产核-2 乳胶对于特定能量快中子的探测效率，潜象衰退的情况，以及供中子探测用的核乳胶片在混合辐射场中的耐 γ 辐射的程度以及慢中子对径迹的贡献。

(一) 实 验 方 法

快中子个人剂量计由核-2 乳胶片(50 微米)和塑料暗盒组成。有时为了提高探测效率，

再在乳胶片表面包上一层聚乙烯 $[(CH_2)_n]$ 辐射体。

当入射中子进入乳胶时,与乳胶和其衬底材料的氢原子核进行弹性散射而形成反冲质子,沿着反冲质子路程上形成潜象,经过显影和定影后即形成反冲质子径迹。用光学显微镜测出乳胶片一定面积上的总径迹数,即可确定工作人员受到的快中子剂量当量。其换算方法如下:

$$D = AN \quad (5)$$

式中: D 为快中子剂量当量(雷姆); N 为单位面积乳胶内径迹数(径迹/厘米²); A 为换算系数(雷姆/径迹·厘米⁻²)。

在实验过程中使用了 Po-Be 中子源, $D(d, n)^3\text{He}$ 、 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应的快中子和重水反应堆水平孔道的慢中子。 $D(d, n)^3\text{He}$ 的中子通量用长中子计数管测定。 $T(d, n)^4\text{He}$ 的中子通量用 CsI 闪烁计数器测量伴随 α 粒子来确定的。反应堆的慢中子通量用含硼乳胶测定。

核乳胶在辐射场中受照射后,经过暗室处理(显影,定影),其处理程序和方法按文献[7]进行。乳胶片晾干后才能进行观测。在目前观测方法中,有使用自动或半自动仪器,也有采用人工观测。在人工观测方法中又可分:一是数单个视野内的径迹数目方法,二是横向面积扫描方法。我们采用后一种方法。测量时,显微镜选用 630 倍的放大倍数(物镜 90 $\times$ 目镜 7 $\times$)。这时,显微镜视野直径为 200 微米,总的扫描面积为 1.4 平方毫米。

(二) 结果和讨论

1. 核-2 乳胶对快中子的探测效率

在不考虑其它含氢物质的影响时,入射中子与乳胶内氢原子核进行弹性散射而形成反冲质子的几率即是核乳胶的探测效率 ε 。其值与弹性散射截面、乳胶单位体积内的氢原子数以及乳胶层厚度成正比

$$\varepsilon = n\sigma_{n-p}x \quad (6)$$

式中, n 为核乳胶单位体积中的氢原子数目; σ_{n-p} 为弹性散射截面(厘米²); x 为乳胶层厚度(厘米)。

快中子个人剂量计往往用在未知能谱的 γ -中子混合辐射场中进行快中子个人剂量测量。由于剂量的灵敏度依赖于入射中子能量,因此,对不同能量的中子探测效率进行刻度是很重要的。

我们将核-2 乳胶片以各种不同的包装,对于特定三种能量(2.5, 3.6 和 14.0 兆电子伏)的快中子进行了探测效率的刻度。

(1) 锡盒包装的核-2 乳胶的探测效率 为了确定核-2 乳胶片对于特定三种能量的快中子探测效率,将核-2 乳胶片装入密封的锡盒(厚度为 0.5 毫米)内。分别用上述特定三种能量的快中子照射。实验结果列在表 5 中。

由于使用锡盒包装,因此有可能将计算的核-2 乳胶探测效率与实测的效率进行比较。核-2 乳胶片厚度为 50 微米,含氢量为 3.8×10^{22} 原子数/厘米³。当入射中子能量为 2.5、3.6 和 14.0 兆电子伏时,弹性散射截面分别为 2.7×10^{-24} [8], 2.1×10^{-24} [9] 和 0.7×10^{-24} [8] 厘米²。将这些数值代入公式(6),即可获得核-2 乳胶探测效率分别为 5.1×10^{-4} , $4.0 \times$

表 5 锡盒包装的核-2 乳胶片的探测效率

入射中子能量, 兆电子伏	照射中子通量, 中子/厘米 ²	径迹数, 条/0.014厘米 ²	实验探测效率, 径迹/中子
2.5	3.0×10^7	222 ± 15	$(5.3 \pm 0.30) \times 10^{-4}$
3.6	0.8×10^7	46 ± 7	$(4.1 \pm 0.41) \times 10^{-4}$
14.0	4.9×10^7	117 ± 10	$(1.7 \pm 0.15) \times 10^{-4}$

表 6 探测效率实验值与计算值的比较

入射中子能量, 兆电子伏		2.5	3.6	14.0
探测效率, 径迹/中子	计 算 值	5.1×10^{-4}	4.0×10^{-4}	1.3×10^{-4}
	实 验 值	$(5.3 \pm 0.30) \times 10^{-4}$	$(4.1 \pm 0.41) \times 10^{-4}$	$(1.7 \pm 0.15) \times 10^{-4}$

10^{-4} 和 1.3×10^{-4} 径迹/中子。现将实验结果与计算值列于表 6, 以资比较。

由表 6 中看出, 用锡盒包装的核-2 乳胶片探测效率的实验值与计算值符合的较好。

(2) 硬塑料暗盒包装的核-2 乳胶的探测效率 在常规监测工作中, 核-2 乳胶片是装入硬塑料暗盒内的。由于塑料暗盒含有大量氢原子, 这相当于乳胶片表面加上一层辐射体, 会使乳胶中记录的径迹增多。为了确定核-2 乳胶片在常规监测条件下的探测效率, 因此亦将这种包装的核-2 乳胶片分别用 $D(d, n)^3\text{He}$ 中子, Po-Be 源中子和 $T(d, n)^4\text{He}$ 中子照射, 其实验结果列于表 7。

表 7 用塑料暗盒包装的核-2 乳胶片的探测效率

入射中子能量, 兆电子伏	中子通量, 中子/厘米 ²	径迹数, 条/0.014厘米 ²	实验探测效率, 径迹/中子
2.5	3.0×10^7	324 ± 12	$(7.7 \pm 0.4) \times 10^{-4}$
3.6	0.8×10^7	92 ± 10	$(8.2 \pm 0.9) \times 10^{-4}$
14.0	4.9×10^7	927 ± 30	$(13.5 \pm 0.5) \times 10^{-4}$

(3) 用聚乙烯辐射体 (27 毫克/厘米²) 包住核-2 乳胶片再装入硬塑料暗盒的探测效率 为了提高剂量计的探测效率, 先用聚乙烯辐射体 (27 毫克/厘米²) 包住核-2 乳胶片, 再装入塑料暗盒。对这种包装的乳胶片的刻度结果列于表 8。

由于 $T(d, n)^4\text{He}$ 中子引起的反冲质子能量比较高, 相应地辐射体厚度应随着反冲质子射程的增加而增加。当辐射体厚度增加到 108 毫克/厘米² 时, 在照射中子通量 (4.9×10^7 中子/厘米²) 和观测的乳胶面积 (1.4 毫米²) 相同的条件下, 质子径迹数为 2000 ± 45 , 对应的探测效率为 $(29.10 \pm 0.65) \times 10^{-4}$ 径迹/中子。

由于该剂量计的探测效率依赖于入射中子能量和包装形式, 因此在使用不同的乳胶片和暗盒包装时, 均须重新对特定能量的快中子进行刻度。

表 8 加辐射体的核-2 乳胶的探测效率

入射中子能量, 兆电子伏	中子通量, 中子/厘米 ²	径迹数, 条/0.014厘米 ²	实验探测效率, 径迹/中子
2.5	3.0×10^7	492 ± 22	$(11.6 \pm 0.5) \times 10^{-4}$
3.6	0.8×10^7	123 ± 11	$(12.0 \pm 1.0) \times 10^{-4}$
14.0	4.9×10^7	1220 ± 35	$(17.7 \pm 0.5) \times 10^{-4}$

2. 核-2 乳胶潜象衰退

当核乳胶受到核辐射照射时形成的潜象是不稳定的，它会随着贮藏的时间延长而逐渐地消失，这个现象叫做潜象衰退。特别是在长时间进行累积个人剂量测量时，这更是一个严重的问题。为了确定核乳胶在大气中和给定温度、湿度条件下的衰退，将核-2 乳胶片装入塑料暗盒，用 Po-Be 中子源照射，然后把核乳胶贮藏在大 气中（平均温度 19°C，平均相对湿度 43%）和给定温度（ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ ）、湿度（相对湿度 95%）的容器中，经过不同的时间，分批进行暗室处理，得出的潜象衰退结果如图 6,7 所示。

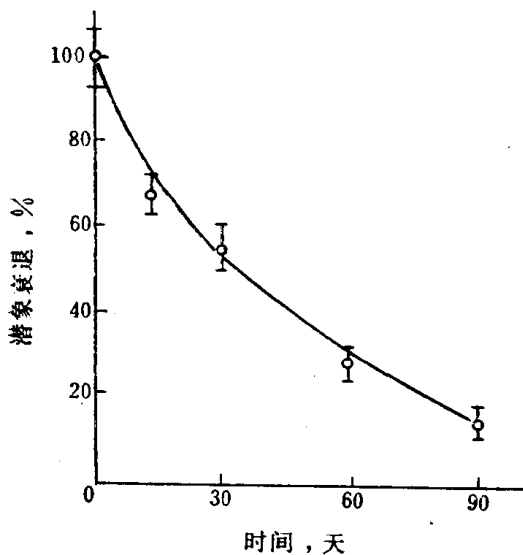


图 6 不密封的核-2 乳胶贮藏 在平均温度为 19°C，平均相对湿度为 43% 的条件下的潜象衰退率

由图 6 的曲线看出，未采用密封措施的核-2 乳胶在平均温度为 19°C，相对湿度为 43% 的条件下贮藏，经过一个月，衰退率达到 50%。我们还将照射后的核乳胶片放在平均温度为 30°C，相对湿度为 95% 的容器中贮存，经过三天以后，径迹衰退率竟达到 90% 以上。由此可见，不密封的核乳胶片径迹衰退是很严重的，不可能用于常规

监测工作。

由图 7 的曲线可以看出，在蜡封的硬塑料暗盒（内装少量硅胶）中的核乳胶片的潜象衰退率可大大降低。在温度为 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 95% 的条件下，该快中子个人剂量计一个月的潜象衰退率为 10%。当现场的快中子个人剂量监测周期定为一个月时，这样的潜象衰退率是容许的。但是由于暗盒接口处用石蜡密封是不牢固的，在实际使用时容易破坏密封，潜象衰退现象还是比较严重的。因此只要设法采取有效的密封措施，克服潜象衰退，它还是一种应用较广的简便的快中子个人剂量监测方法。

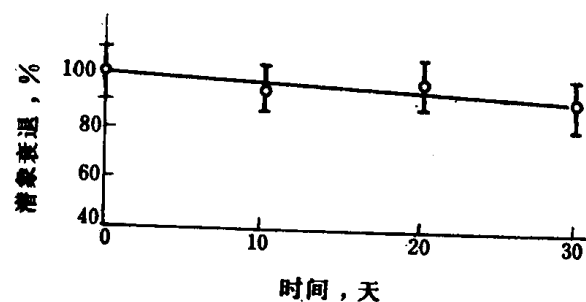


图 7 密封的核-2 乳胶片（暗盒内放有少量硅胶），在温度为 35°C 和相对湿度为 95% 的条件下的潜象衰退率

3. 核-2 乳胶在混合辐射场中耐 γ 辐射的程度

当快中子个人剂量计在中子和 γ 辐射的混合辐射场进行测量时, 受到强 γ 辐照后, 乳胶中的 AgBr 颗粒感光。经暗室处理后, 乳胶内 γ 雾点增多。这样会使径迹分辨困难, 特别对短径迹的辨别更为困难, 这影响了测量的准确度。在雾点特别多时, 中子径迹的观测简直不可能进行。为了确定核-2 乳胶耐 γ 辐射的程度, 将硬塑料暗盒包好的乳胶片用 Po-Be 源中子和 Co^{60} γ 辐射照射, 然后再进行暗室处理和测量。经实验确定, 当受到 3 伦以下的 γ 辐照时, 对径迹观测无妨碍。在实验过程中发现同类而不同批的核乳胶耐 γ 辐射的程度是不同的。

4. 核-2 乳胶对慢中子的灵敏度

用核-2 乳胶片在混合辐射场中测量快中子个人剂量的方法, 是测量一定面积上所记录的反冲质子径迹数目。由于核乳胶成分中还会有大量氮, 在慢中子作用下会产生 $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ 反应, 这同样会在乳胶内形成质子径迹。在观测径迹时, 不容易把它们区分开来。

为了确定慢中子在核-2 乳胶中形成质子径迹的几率, 把两块核-2 乳胶片的其中一片包上厚约为 0.5 毫米的镅片吸收慢中子, 不包镅片的核-2 乳胶记录快中子和慢中子, 包上镅片的核-2 乳胶片基本上只记录快中子, 两者之差就是慢中子在核-2 乳胶内形成的质子径迹。用核-2 载硼 (^{10}B) 乳胶测定慢中子通量。包装好的核乳胶片放在重水反应堆水平孔道内照射, 慢中子的能量曾用晶体谱仪测定为 0.073 电子伏。实验结果表明, 该中子剂量计对快中子 ($E_n = 3.6$ 兆电子伏) 的灵敏度和对慢中子 ($E_n = 0.073$ 电子伏) 的灵敏度基本上是一致的。因而说明了该方法同时记录快中子和慢中子总剂量当量的可能性。当工作需要分别测量这两种中子剂量时, 只要乳胶片包上一层镅片 (约 0.5 毫米) 吸收慢中子, 即可单独地记录快中子剂量。

5. 由径迹数到剂量当量的换算系数 A

参考文献[10]给出了对于能量为 2.5, 3.6 和 14.0 兆电子伏的快中子, 相应于 1 雷姆剂量当量的中子通量分别为 2.88×10^7 、 2.30×10^7 和 1.73×10^7 中子/厘米²。用硬塑料暗盒包装的核-2 乳胶 (50 微米) 快中子个人剂量计对上述三种能量中子的探测效率分别为 7.7×10^{-4} 、 8.2×10^{-4} 和 13.5×10^{-4} 径迹/中子。因此当测量面积为 0.014 厘米² 时, 相应的径迹数分别为 310、265 和 328, 因而每条径迹相应的剂量当量 (即换算系数 A) 分别为 3.2×10^{-3} 、 3.8×10^{-3} 和 3.1×10^{-3} 雷姆/径迹。由此可知, 对于上述三种特定中子能量, 换算系数 A 基本上是一致的。

(三) 结 论

核-2 乳胶和硬塑料暗盒组成的快中子个人剂量计具有灵敏度较高, 能较长期地保存原始数据以及使用方便等优点。但是主要缺点是在较高的温度和湿度的条件下, 潜象衰退比较严重, 有时甚至不可能用于常规监测。不过只要采取有效的密封措施, 可降低径迹衰退率。至今各国在快中子个人剂量监测中, 它仍然是被广泛使用的方法。