

放射性表面污染的监测

原子能出版社

放射性表面污染的监测

[英] R. F. 克莱顿 编

黄 治 俭 译

丁 民 德 校

张 延 生

原子能出版社

内 容 简 介

本手册是国际原子能机构第 120 号技术报告, 由英国哈威尔原子能研究所 R. F. 克莱顿编写。手册中论述了表面污染的直接监测方法和间接监测方法及其优点和缺点, 指出很多间接监测技术都有一定的采用价值。手册中还讨论了表面污染的推定资用限值 (DWL), 引用了一些目前在一些国家使用的表面污染推定限值的例子。手册中也讨论了可以用来估计工作人员受到放射性表面污染照射的危害或剂量的一些辅助技术。本手册可供有关厂矿或放射性实验室在辐射监测中参考。

放射性表面污染的监测

[英] R. F. 克莱顿 编

黄治俭 译

丁民德 张延生 校

原子能出版社出版

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(限国内发行)

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $1\frac{3}{4}$ · 字数 37 千字

1976 年 8 月北京第一版 · 1976 年 8 月北京第一次印刷

印数 001—5,000 · 定价: 0.17 元

统一书号: 15175 · 066

目 录

1. 总论	1
1.1 目的和范围	1
1.2 定义	2
1.3 表面污染的危害性	3
1.4 表面污染的推定资用限值	4
1.5 监测技术	4
1.6 记录保存	5
2. 推定资用限值	5
2.1 保健方面的考虑	5
2.2 根据吸入的危害推定的资用限值	6
2.3 根据外照射的危害推定的资用限值	7
2.4 根据摄入的危害推定的资用限值	7
2.5 目前应用推定资用限值的例子	8
2.6 推定资用限值的放宽	11
3. 表面污染的监测技术	14
3.1 概论	14
3.2 方法的选择	16
4. 表面污染的直接监测方法	17
4.1 α 污染监测	17
4.2 β 污染监测的一般方法	18
4.3 低能 β 污染的监测	19
5. 表面污染的间接监测方法	19
5.1 概论	19
5.2 干擦拭法	21
5.3 湿擦拭法	21
5.4 大面积擦洗	22

5.5 粘带采样	22
5.6 “空气擦拭”取样	23
5.7 “吸气”技术	23
5.8 冲洗溶液和洗涤溶液的检查	24
5.9 H^3 擦拭	24
5.10 皮肤和伤口的监测	25
5.11 间接监测方法中使用的仪器	25
6. 辅助技术	25
6.1 射线自显影法	25
6.2 热释光剂量测定法	26
6.3 辐射能谱测定法	27
6.4 空气监测	29
6.5 沉降盘	30
6.6 套鞋和清洁用具的监测	30
6.7 个人剂量测定法	30
6.8 生物监测	31
6.9 针孔照相机	31
7. 表面污染监测设备的刻度和性能检验	31
8. 仪器	35
8.1 选择仪器的标准	35
8.2 选用仪器的详细评价	38
8.2.1 机械性能	38
8.2.2 电气性能	39
8.2.3 放射学性能	39
8.3 使用仪器的例子	40
参考文献	45
资料目录	49

1. 总 论

1.1. 目的和范围

本手册提供给保健物理工作者和使用放射性物质的其它工作人员作为工作环境监测方法的实用手册。第2章简要地讨论了表面污染推定资用限值的由来。

手册中也讨论了直接监测法和间接监测法的应用，优点和缺点，并描述了帮助保健物理工作者解释其测量结果的一些有用的辅助办法。

本手册并不讨论核工业企业周围环境中表面污染的监测，这方面的监测已经在国际原子能机构的另外两本手册中讨论过了，一本是正常运转下环境污染监测手册，另一本是事故情况下环境污染监测手册^[1,2]。

虽然本手册主要不是着眼于人体污染的测量，但仍引用了皮肤污染的容许水平。很多表面污染监测方法都可以用来测量皮肤上的放射性污染量，但是对工作人员体内污染的监测，则要求专门技术，这不在本手册讨论范围之内。

手册中所阐述的表面污染监测技术主要是用于预防或控制放射性的危害，而不是为了防止沾污对实验或操作引起的干扰。在后一种情况下，容许水平可能更低些，并且在监测评价时要求比辐射防护的情况更为严格。

1.2. 定 义

监测 国际放射防护委员会第四委员会把监测定义为“出于对辐射或放射性物质的照射进行评价或者控制的目的，而从事的辐射测量或放射性测量”并把表面污染监测作为监测的主要任务^[3,4]。

放射性表面污染^[5] 是指以不可控制的方式沉积在生物体或非生物体上面的不希望有的放射性物质，不论污染的程度如何，它不是给操作带来麻烦，就是引起放射性危害。

放射性表面污染的分类 放射性污染可采用下述几种方法进行分类：按照辐射的类型，按照转移到其它物体上的能力，或者按照污染的物理状态。

(a) 按照辐射的类型主要分为 α 、 β 和低能 β 辐射体。就表面污染监测技术来说， X 射线和 γ 射线是次要的，但是，决不能忽视由于它们的存在而引起的辐射危害。

(b) 污染可以进一步分为“固定的”或者“松散的”。“固定的”污染是指当两个表面偶尔接触时，污染不会从污染表面转移到未污染表面；反之，“松散的”污染是指在这些情况下污染容易被转移。

(c) 固体物体的表面污染可以由于粉末的泄漏、表面和放射性物质之间的接触、放射性液体和溶液在材料表面上的干涸，以及空气中带有的放射性物质的沉积而产生。由于吸附放射性气体，如氚，或蒸汽，如氚水，也可能产生表面污染。

放射性区域 是指这样的区域，在这些区域内工作人员可能会受到放射性表面污染和射线的照射，或者受到吸入或咽下

的来自气载的和表面污染的放射性物质的内照射，并且照射的程度又可能超过国际放射防护委员会（ICRP）或者国际原子能机构（IAEA）所建议的水平；这些区域除了实验室和操作区以外还可能包括更衣室和办公室。

非放射性区域 是指除了上面定义的放射性区域以外的所有区域。

1.3. 表面污染的危害性

放射性表面污染的存在，带来了潜在的放射性危害。表面污染可以漂浮到空气中去，随后被吸入人体，或者由于接触而转移到手上，接着又转移到食物上而被咽下，此外，也可以穿透完好的皮肤或进入开放的伤口而引起内照射危害。在 β 和 γ 辐射体的情况下，还可能在外照射危害。

假如被污染的物件是可以移动的，它可能被移至非放射性区域，在那里，本来没有预料到会有放射性物质的存在，因而操作时也不可能存在在放射性区域常常采取的那些防护措施。

放射性表面污染的存在即使没有达到足以危害人员健康的程度，也可以干扰实验工作，给低水平计数造成假计数，或者使放射化学实验产生交叉污染。

由于不希望有放射性表面污染，应该周密地设计实验室和放射性厂房，力求减少污染的危害。选用合适的操作放射性物质的设备，选择正确的操作方法，并严格管理和处置放射性废物，都有助于减少污染的危害。

1.4. 表面污染的推定资用限值

已经定出了一些推定资用限值(DWL),用来作为可以容许的表面污染水平的指示。这些限值就是指由体内污染或体外污染辐射所造成的照射极少可能超过最大容许水平的值。

本手册中推定的表面污染资用限值(详细讨论见第2章)仅仅基于放射性防护的考虑。鉴于污染会干扰灵敏的测量,或者为了预防实验之间的交叉污染,可以规定出更严格的限值。对于这些必须逐项进行估计的情况,本手册不可能给出数值。同时,测量设备也过于专门化,它涉及到在有足够装备的实验室中使用低本底计数装置。

1.5. 监测技术

表面污染监测技术可以粗略地分为“直接监测法”和“间接监测法”。直接监测法是指辐射探测器直接对准被检查的表面,或者是被检查表面直接对准探测器。由于不利的几何因素、其它辐射的干扰、或者当需要确定污染是不是“固定的”时候,直接监测方法是不适用的,这时就得采用间接监测方法。间接监测方法通常包括表面污染的取样(例如进行擦拭)和对擦拭样品的放射性进行测量两部分。在很多情况下,这两种方法是相互补充的,为了获得被检查表面状态的一个完整图像,二者必须同时采用。

在第3章中描述了选择表面污染监测技术应考虑的一些要点和各种监测方法的相对的优点和限制。

1.6. 记录保存

监测记录可用来核对监测是否正确和是否按要求的次数在进行；它使职能机构能对有危险的操作进行密切的监视，以估价控制手段的有效程度。同时监测记录也是构成保健物理工作者可以作出建议改变操作步骤的基础。

表面污染监测记录的形式和内容以及它们的保留时间主要取决于场所条件和管理与规程方面的要求。

2. 推定资用限值

2.1. 保健方面的考虑

放射性的安全管理必然要联系到工作人员受到的最大容许照射量，不论这种照射起源于体外的或体内的放射性物质。

为了限制由于放射性核素沉积在工作人员体内而使他们受到的剂量，使用了最大容许体内载积量^[6]的概念。已经提出了一些数字模型^[6,7]来描述放射性核素被摄入以后在人体内的行为，从这些数据算出了各种放射性核素在空气中和水中的最大容许浓度^[6,8]。由这些基本的标准可以推导出表面污染的标准，这种污染水平所造成的结果应该保证不超过基本标准^[9]。

根据各种放射性核素在空气中的最大容许浓度而作出的计算，可以获得一系列推定的资用限值。除此以外，从表面

转移出的放射性的数量还取决于表面的类型、所进行的操作、以及污染物的物理状态。试图逐一列出推定的资用限值来包括每一种可能发生的情况是不现实的。要得到合理的解决，必须假定可能遇到的最坏情况，即假定可能存在危害最大的某种放射性核素发生大面积散播，而散播的情况又使它易被吸入或咽下。

2.2. 根据吸入的危害推定的资用限值

为了估计表面污染在各种情况下漂浮到空气中去的数量，已经推求出一些“回浮因数”。这个因数定义为空气污染（微居里/米³）同表面污染（微居里/米²）的比值^[10-14]。引用的数值在 3×10^{-3} /米到 2×10^{-6} /米的范围内变化；平均值 5×10^{-5} /米似乎适合于一般情况。Pu²³⁹ 是经常遇到并且可能被吸入的毒性最大的 α 辐射体，从上述数值以及 Pu²³⁹ 在空气中的职业性最大容许浓度 [MPC_{空气} (2×10^{-12} 微居里/厘米³)]，可以算出这种放射性核素污染的推定资用限值为 4×10^{-6} 微居里/厘米²。

均匀广泛散播的污染在实际工作中通常是不会遇到的。仔细选择合适的表面和鞋具可以减少回浮因数。此外，重新浮起来的物质的颗粒并不都是可以吸入那样大小的。由于这些起缓和作用的因素，建议把该限值放宽到 10^{-5} 微居里/厘米²。在某些情况下，当发生了这种水平的大面积表面污染时，空气中的放射性浓度可能会超过容许水平。

Sr⁹⁰ 是通常遇到最毒的 β 辐射体。应用类似的准则，对于 Sr⁹⁰ 引起的表面污染，计算得出的推定资用限值为 2×10^{-3} 微居里/厘米²。

2.3. 根据外照射的危害推定的 资用限值

所有的 β 辐射体都是外照射的一种来源。 β 粒子最大能量在0.5到3.0兆电子伏范围，强度为1微居里/厘米²的平面源，其表面的剂量率大约是7拉德/小时^[15]。污染表面的反散射可以使这一数值增加到1.5倍。手是人体最易暴露于污染表面的部位，而对于人的四肢所规定的最大容许剂量是75雷姆/年或1.5雷姆/周。单独由于污染而产生的剂量限制在上述值的1/10是适宜的。因此，假设在40小时工作周中连续照射，对于 β 污染的推定资用限值不宜超过 4×10^{-4} 微居里/厘米²（约相当于3毫拉德/小时）。

对于一些低能 β 辐射体（最大能量为0.2兆电子伏）可以放宽10倍。

2.4. 根据摄入的危害推定的资用限值

管理放射性区域内操作的安全规程，例如，禁止在那里饮食、喝水和吸烟，以及良好的监督制度，可以使直接摄入的危险减少到可以忽略的程度。所以，推定资用限值可以根据间接的摄入危险推算出来。可能性最大的间接咽入途径是通过污染了的手。

关于皮肤污染程度与咽入率的关系，还没有定量的数据可供应用。但是曾有人这样假定，一个人每天可能咽入10平方厘米的皮肤上的全部污染。从这个假定出发，并考虑了操作 Ra^{226} 的辐射工作者每天的最大容许咽入量（ Ra^{226} 被咽

入后的危害大于 Pu^{239} , $\text{MPC}_{\text{水}}\text{Ra}^{226}=4 \times 10^{-7}$ 微居里/厘米³; $\text{MPC}_{\text{水}}\text{Pu}^{239}=10^{-4}$ 微居里/厘米³), 以及 Sr^{90} 和 Pb^{210} 这两种可能咽入的危害最大的 β 辐射体 ($\text{MPC}_{\text{水}}\text{Sr}^{90}=10^{-5}$ 微居里/厘米³; $\text{MPC}_{\text{水}}\text{Pb}^{210}=4 \times 10^{-6}$ 微居里/厘米³), 推定的皮肤污染资用限值, 对于 α 污染定为 10^{-5} 微居里/厘米², 而对于 β 污染则定为 10^{-4} 微居里/厘米²。在这样水平下的咽入量大约相当于国际放射防护委员会所建议的最大容许浓度的 1/10。由于另外还存在着照射皮肤基底层以及通过皮肤而被吸收到血液中去危险^[16], 要放宽上述限值必须经过慎重的考虑。此外, 在决定手部污染的推定资用限值时还必须考虑到工作人员的风俗和饮食习惯^[17]。

2.5. 目前应用推定资用限值的例子

前面已经指出, α 污染的最大危险是吸入重新悬浮起来的放射性物质, 而对于 β 放射性来说, 外照射危害则是要限制的因素。如果应用了有关的推定资用限值, 那么咽入表面污染的放射性物质的危险实际上是排除了。由皮肤污染推导出来的水平同根据吸入和外照射危害而推导出来的水平是符合的。表 1 和表 2 给出了一些目前在英国和美国所应用的推定资用限值的例子。其它例子登载在国际放射防护委员会刊物 5^[19] 和国际原子能机构安全丛书第 1 集中^[20]。表 3 和表 4 对各国原子能中心使用的表面污染水平进行了比较^[17-24]。

国际原子能机构建议, 用于运输放射性物质的容器外表面的放射性污染不应超过表 5 中所引用的水平。

其它国家实行的规程要求封装的治疗用放射源和工业用

表 1 表面污染的推定资用限值 [18]^a

区域类型	1	2	3	4
	主要的 α 辐射源 ^b (微居里/厘米 ²)	低毒性的 α 辐射源 ^c (微居里/厘米 ²)	β 辐射源 (微居里/厘米 ²)	最大能量小于 0.2 兆电子伏的低能 β 辐射源 ^d (微居里/厘米 ²)
非放射性区 与低放射性区 放射性区	10^{-5}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-3}
	10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-2}
工作人员衣服 通常不在非 放射性区穿的 衣服	10^{-5}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-3}
	10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-2}
皮 肤	10^{-5}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}

a. 在无生命区域允许在 300 平方厘米面积上平均，地板，墙壁和天花板允许在 100 平方厘米面积上平均。皮肤允许在 100 平方厘米面积上平均，手允许在其全部面积，通常为 300 平方厘米面积上平均。

b. 除了表中 c 以外的所有 α 辐射源。

c. 铀同位素(除了分离出的质量数为 230、232 或 233 的同位素)；天然铀，浓缩铀和贫化铀；天然钍；钍²³²，稀释到与天然铀和天然钍比放射性同数量级的 Th²³² 和 Th²³⁰；短寿命的核素，例如 At²¹¹，Ra²²⁶ 和钍的同位素子体。

d. 对低能 β 辐射源的放宽，不能应用到发射 β 的钍同位素。

放射源的外表面放射性污染不应超过 0.5 微居里。

面罩，气罩，气衣头盔或其它类型的呼吸面具的内表面污染不应超过推定的皮肤污染的资用限值。在这些水平上间断使用上述用具时，不会超过 Pu²³⁹ 和 Sr⁹⁰ 的最大容许日摄入量。长期使用或定期使用这些用具时，在较低污染水平下工作较为适宜。

表 2 表面污染的规定值^[18] (美国橡树岭国立实验所)

位 置	方 法	污 染 数 值
皮肤-手	直读	α 150 衰变/分·100 厘米 ² , 或 6.7×10^{-7} 微居里/厘米 ² β - γ 0.3 毫拉德/小时
皮肤-一般躯体	直读	α 150 衰变/分·100 厘米 ² 或 6.7×10^{-7} 微居里/厘米 ² β - γ 0.06 毫拉德/小时
衣服 (非污染地带)	直读	α 150 衰变/分·100 厘米 ² 或 6.7×10^{-7} 微居里/厘米 ² β - γ 0.25 毫拉德/小时
衣服 (污染地带)	直读	α 150 衰变/分·100 厘米 ² 或 6.7×10^{-7} 微居里/厘米 ² β - γ 0.75 毫拉德/小时
非污染区域	直读	α 300 衰变/分·100 厘米 ² 或 1.3×10^{-6} 微居里/厘米 ² β - γ 0.25 毫拉德/小时
	可转移的 (擦拭测量)	α 30 衰变/分·100 厘米 ² 或 1.3×10^{-7} 微居里/厘米 ² β - γ 1000 衰变/分·100 厘米 ² 或 4.5×10^{-6} 微居里/厘米 ²
再发出去的工具和设备	直读	α 300 衰变/分·100 厘米 ² 或 1.3×10^{-6} 微居里/厘米 ² β - γ 0.05 毫拉德/小时
	可转移的 (擦拭测量)	α 30 衰变/分·100 厘米 ² 或 1.3×10^{-7} 微居里/厘米 ² β - γ 200 衰变/分·100 厘米 ² 或 9×10^{-7} 微居里/厘米 ²

表 3 各国原子能中心采用的表面污染最大容许水平的数据^[17]

地 点	α 污染水平 (衰变/分·100厘米 ²)	β - γ 污染水平 (毫拉德/小时)
印度特朗贝原子能所	600	0.3
英国哈威尔原子能研究所(放射性区)	20000	7.5
美国橡树岭国立实验所 ^[20]	300	0.25
美国洛斯-阿拉莫斯科学实验所 ^[21]	100	0.05
美国布鲁克海文国立实验所 ^[22]	100	0.1
苏联 ^[23]	133	1.4

在更换衣服时, 污染衣服上的放射性物质的回浮因数已经推算出为 10^{-4} /米到 10^{-3} /米之间^[12]。污染衣服对工作人员的最大吸入危险发生在脱衣服以及清洗前在洗衣房处理期间。污染衣服在重新穿之前应该清洗, 任何剩余污染可以认为是固定的。衣服的污染水平不应超过皮肤污染的容许水平。对只在放射性区域穿的全身工作服和实验室外套可放宽 10 倍。

2.6. 推定资用限值的放宽

放宽上述某些基本的推定资用限值是可以容许的。除了 2.2 节(第 2 段)所描述的一些缓和因素外, 还可以考虑某些其它因素。到目前为止所考虑的表面污染的吸入危害只是假设松散污染至少均匀分布在几平方米以上。但在实际工作中这是很少发生的。甚至在大范围的污染情况下, 这种污染也只是少数有限区域的斑点或者是每平方米上一些分散的点。如果有限区域规定不超过 100 厘米²/米², 那么由于这种类

表 4 表面污染的规定值的举例⁽¹⁾⁽²⁾

位 置	美国国家辐射防护委员会手册48	英 国 规 程 (微居里/厘米 ²)	加拿大原子能公司 ^c (微居里/厘米 ²)	法国原子能委员会 (微居里/厘米 ²)
1. 手和其它部位	0.1 毫伦/小时 ^a 1.0 毫伦/小时 ^b	α 10^{-5} β 10^{-4}	α 10^{-6} β 10^{-4}	α 5×10^{-6a} β 5×10^{-5a} β 5×10^{-5b}
2. 工作人员衣服	同 上	α 10^{-5} α 10^{-4a} β 10^{-4b}	α 10^{-6} β 5×10^{-4}	α 10^{-5a} β 10^{-4a} β 10^{-4b}
3. 防护服、玻璃器皿、工具、 赤手操作的物体	同 上	α 10^{-4} α 10^{-3a} β 10^{-3b}	α 10^{-6} β 10^{-8}	α 10^{-4a} β 10^{-3a} β 10^{-3b}
4. 放射性区域	同 上	同 上	α 10^{-6} β “清洗后”接触 时小于 毫伦/小时	同 上
5. 非放射性区域	同 上	α 10^{-5} α 10^{-4a} β 10^{-4b}	α 10^{-6} β 10^{-5}	α 10^{-5a} β 10^{-4a} β 10^{-4b}

a. 很有害的放射性核素 } 在美国国家辐射防护委员会手册 92 中, 相应于表 1 中第 1 组和 2 组放射性核素的水平定为
b. 其它放射性核素 } 0.1 毫伦/小时而相应于表 1 中第 3, 4 组的放射性核素定为 1.0 毫伦/小时。

c. 主要的检查必须是表面“清洗后”进行, “擦拭”检查不能用微居里/厘米²表示。放射性区的本底达到 10^{-4} 微居里/厘米²时所采用的仪器就不能测量 β 了。按这些条件, 列入到这栏中的值同其它栏表出的值是一致的。