

范深根 娄云 编著

放射性和辐射的 安全使用

FANG SHE XING HE
FU SHE DE
AN QUAN SHI YONG

中国科学技术出版社



本书内容着重于实际应用，通俗易懂，可供工、农、医各行业从事放射性物质和辐射源操作的人员、辐射防护监督检查管理人员参考。

ISBN 7-5046-3138-8



9 787504 631381 >

ISBN 7-5046-3138-8/R·900

定价：25.00 元

放射性和辐射的安全使用

范深根 娄 云 编著

中国科学技术出版社
北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

放射性和辐射的安全使用/范深根, 娄云编著. —北京:
中国科学技术出版社, 2001. 8

ISBN 7-5046-3138-8

I. 放… II. ①范…②娄… III. 辐射防护—基本知识 IV. TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 054815 号

中国科学技术出版社出版

北京海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

迪鑫印刷厂印刷

*

开本: 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张: 11 字数: 275 千字

2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1—6000 册 定价: 25.00 元

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、
脱页者, 本社发行部负责调换)

内 容 提 要

本书概括地介绍了使用放射性物质中应注意的主要辐射防护问题。全书分七章：一、放射性基础知识；二、辐射防护标准；三、致电离辐射源的外照射防护；四、开放型放射性物质的安全操作；五、辐射防护监测；六、辐射防护管理；七、放射事故处理。书末附录中列出了较多的辐射防护工作中常用的有关标准和数据。

本书内容着重于实际应用，通俗易懂，可供工、农、医各行业从事放射性物质和辐射源操作的人员、辐射防护监督监测管理人员参考。

前 言

为了适应放射性同位素和辐射应用的迅速发展和广大读者的需要，我们对 1983 年原子能出版社出版的《放射性物质的安全使用》一书进行了修订，并取名为《放射性和辐射的安全使用》。

随着人类文明的不断发展，人们对辐射应用中的安全防护所给予的关注越来越多，辐射防护理论、技术和实践，在世界范围内都得到很大的发展。近二十年来，特别是 1989 年国务院总理第 44 号令《放射性同位素与射线装置放射防护条例》颁发以来，我国的辐射防护水平也有了很大提高。但是，我国的辐射防护仍然离核技术飞速发展的需要有很大的距离。我们希望本书的出版为缩短这一距离做点微薄贡献。

本书是《放射性物质的安全使用》一书的修订版。由于原书着重实际应用，内容适宜，通俗易懂，所以得到较多读者欢迎。本书再版时注意了上述特点，所以尽量保留了原来的内容和叙述方式，同时又根据我国核技术应用范围和规模的变化及辐射防护的发展，除改用了许多新资料外还增加或加强了在工业探伤、辐照装置、油田测井、医学应用和运输方面的辐射防护技术和要求的叙述，附录中列出了较多的相应标准。

本书的出版得到了中国原子能科学研究院同位素研究所和反应堆工程研究所及胜利石油管理局测井公司等单位大力支持；得到了杨金钟、何荣华、吴水龙、魏木水、张文志和李植纯等辐射防护专家的鼓励和帮助；尹远淑、谢广泰高级工程师认真审阅了本书，提出很多宝贵意见。在此向给予本书帮助和支持的单位及专家深致谢意。

编 者

2001 年 2 月

目 录

第一章 放射性基础知识

一、放射性及其度量单位	(1)
1. 放射性同位素	(2)
2. 放射性活度	(4)
3. 辐射量及其单位	(6)
二、射线与物质的相互作用	(8)
1. α 粒子	(8)
2. β 粒子	(9)
3. γ 射线	(11)
4. 中子	(12)
三、辐射对人体的影响	(13)
1. 辐射效应分类和辐射损伤机理	(13)
2. 剂量与效应的关系	(14)
3. 放射病与诊治	(19)
四、日常生活中遇到的辐射照射	(20)
1. 天然本底照射	(20)
2. 辐射源应用中的照射	(23)
3. 环境污染	(25)
4. 受照剂量比较	(26)

第二章 辐射防护标准

一、辐射防护的目的和标准	(28)
1. 辐射防护的目的	(28)

2. 国际放射防护委员会对辐射防护标准的建议	(29)
3. 辐射防护标准与相应的危险	(31)
4. 辐射防护标准分类	(33)
二、电离辐射的剂量限值	(34)
1. 职业照射的剂量限值	(35)
2. 公众照射的剂量限值	(37)
3. 导出剂量限值	(37)
4. 干预	(42)
三、医疗照射的控制	(44)

第三章 致电离辐射源的外照射防护

一、辐射场强度计算	(52)
1. 点状 γ 源的辐射场强度	(52)
2. 皮肤表面 β 污染的吸收剂量	(55)
3. 中子辐射场中的剂量	(57)
二、外照射防护的一般方法	(60)
1. 时间防护	(60)
2. 距离防护	(60)
3. 屏蔽防护	(61)
三、屏蔽厚度计算和屏蔽体结构	(63)
1. α 、 β 粒子的屏蔽	(63)
2. γ 射线屏蔽	(65)
3. 中子的屏蔽	(87)
4. 屏蔽材料的结构形式	(89)
四、对建筑物的要求	(90)
1. 地点选择	(90)
2. 屏蔽	(90)
3. 监测设施	(92)

4. 通风	(92)
五、X 线机和加速器的防护	(94)
1. X 线机	(95)
2. 加速器	(100)
六、操作注意事项	(102)
1. 通则	(102)
2. X 线机和加速器	(103)
3. 医学应用	(104)
4. 油田测井和小放射源其他应用	(105)
七、 γ 辐照装置安全技术	(107)
1. 对辐射源要求	(108)
2. 辐照室防护要求	(109)
3. 安全联锁措施	(112)
八、 γ 工业探伤防护	(121)
1. 工作场所要求	(122)
2. 源和源容器要求	(124)
3. 辐射监测	(126)
4. 安全操作程序指导	(127)

第四章 开放型放射性物质的安全操作

一、开放型放射性物质安全操作的基本原则	(134)
二、工作场所的分级及其要求	(135)
1. 放射性核素毒性分组	(135)
2. 工作单位的分类及地址选择	(137)
3. 工作场所分级	(139)
4. 对工作场所内部的要求	(142)
三、放射性废物的处理	(155)
1. 固体放射性废物	(155)

2. 液体放射性废物	(158)
3. 气体放射性废物	(161)
四、操作注意事项和防护用品	(166)
1. 操作注意事项	(166)
2. 个人防护用品和个人卫生	(167)
五、放射性核素临床诊疗的安全防护举例	(169)
1. 主要危害因素	(169)
2. 临床应用时的安全操作	(171)
3. 实验室装备要求与“三废”处理	(175)
六、放射性污染的去除	(175)
1. 去污的一般原则	(176)
2. 体表去污	(177)
3. 设备表面去污	(179)

第五章 辐射防护监测

一、个人剂量监测	(185)
1. 外照射监测	(185)
2. 内照射监测	(190)
二、工作场所监测	(194)
1. 外照射监测	(194)
2. 表面污染监测	(195)
3. 工作场所空气污染监测	(196)
4. 密封源密封性检查	(201)
5. 小结	(202)
三、外环境监测	(203)
四、辐射防护监测仪表	(204)
1. 探测原理和仪表结构	(206)
2. 仪表的刻度和标准源	(213)

3. 测量注意事项	(214)
-----------------	-------

第六章 辐射防护管理

一、管理体系与法规标准	(216)
二、豁免管理	(218)
1. 豁免的一般原则	(219)
2. 可豁免的源与豁免水平	(219)
三、规章制度	(221)
四、贮存和运输	(224)
1. 放射性物质的贮存	(224)
2. 放射性物质的运输	(225)
五、健康管理	(227)

第七章 辐射事故处理

一、事故分类和原因分析	(229)
1. 分类和分级	(229)
2. 原因分析	(233)
3. 我国放射事故概况	(234)
二、事故处理原则和准备工作	(238)
1. 事故处理一般原则	(238)
2. 准备工作	(239)
三、事故处理方案和安全防护人员职责	(240)
1. 事故处理方案	(240)
2. 安全防护人员职责	(242)
附录一 职业照射放射防护标准 (摘录)	(243)
附录二 γ 辐照装置设计建造和使用规范 (GB 17568—1998) (摘录)	(247)
附录三 γ 射线工业探伤放射防护标准 (摘录)	(256)

附录四	核子仪器放射防护标准 (摘录)	(264)
附录五	医学应用放射防护标准 (摘录)	(272)
附录六	油田测井用放射源的放射防护标准 (摘录)	(298)
附录七	放射性物质安全运输规定 (GB 11806—1989) (摘录)	(307)
附录八	常用放射性核素的某些物理和辐射防护参数表	(316)
附录九	剂量当量与 β 粒子和中子的通量密度及积分通 量的换算	(328)
附录十	一些物质的密度	(329)
附录十一	国际制单位与现用辐射量单位换算表	(330)
附录十二	e^+ 和 e^- 值表	(331)
附录十三	γ 辐照装置、工业探伤、运输和放射性污染 事故实例	(335)

第一章 放射性基础知识

一、放射性及其度量单位

大家知道，地球上的物质有千千万万，品种繁多，结构各异。但是，仔细分析起来，都是由 100 多种基本元素组成的。到目前为止，人们已经发现了 118 种元素，其中 92 种是地球上天然存在的，26 种是人造元素。而且也已研究清楚，构成元素的最小单元是原子，各个元素有各自的原子，毫不混淆。

原子是很小的，直径只有 10^{-8} 厘米左右。若将一亿个原子一个紧挨一个地排列起来，大约也只是一厘米长。一个原子的质量约为 $10^{-24} \sim 10^{-22}$ 克。

原子虽然很小，但仍然是可分的，并具有十分复杂的结构。原子好像是一个小的太阳系，中心是个半径约为 10^{-12} 厘米的小而重的带正电的原子核，它的质量几乎等于整个原子的质量。原子核周围有若干个小而轻的带负电的电子环绕着它在一定的椭圆形的或圆形的轨道上不断高速地旋转着。这些确定的轨道组成一系列壳层，这一个个壳层叫做能级或量子级。轨道或壳层的直径比原子核的直径大。壳层或用字母 (K, L, M, N, O, P, Q) 或用量子数 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) 来表示。原子核的正电荷数目与绕行电子的数目相等，所以原子本身是不带电的，呈中性。但是，正是这些不同的核电荷数代表了不同性质的原子，即区分了不同的元素。

原子核是由带正电的质子和不带电的中子构成的，中子和质子大致具有相等的质量。一种元素的原子核所包含的质子数（亦

即是核外绕行的电子数)称为该元素的原子序数,通常用 Z 表示。原子核的中子数和质子数的总和构成原子核的质量数,通常用 A 表示。因此,一个原子核常用 A_ZX 来表示。世界上这一百多种元素,按照核外电子数目的多少和它们的排列规律所构成的表格,称为元素周期表。一种元素在表中占有一个固定的位置,丝毫不错乱。核外电子的数目,特别是最外壳层的电子数目,决定了该种元素的主要化学性质。

1. 放射性同位素

这里首先回答什么是同位素。同位素就是那些原子序数相同而原子质量数不同,也就是核里质子数目相同而中子数目不同,在元素周期表内占据着同一位置的那些物质。一个元素的所有同位素,其化学性质几乎都一样。一种元素往往有几种到几十种同位素。钋的同位素最多,从钋 - 192 (${}^{192}\text{Po}$) 到钋 - 218 (${}^{218}\text{Po}$) 共有 27 种。目前已知的 118 种元素的同位素共达 2000 余种。而对于在核内具有指定数目的中子和质子的一种原子又称为“核素”。

同位素又可分为稳定同位素和放射性同位素两种。稳定同位素原子核的质子数、中子数以及核结构都是稳定不变的,自然界中多数原子核属于这一类;原子核不稳定,能自发地放出射线而变成另一种核素(即改变了原子核中的质子数和中子数)的同位素叫做放射性同位素。有些元素的同位素虽然原子核的质子数和中子数都不会改变,但其核结构能自发地发生改变,例如核外电子能级的改变而放出电磁辐射,它们也属于放射性同位素。原子核放出射线而变成另一种核素的现象叫衰变。在这种现象中,最初的那个原子核叫母体,放出射线后生成的新核素称为子体。放射性同位素包括有天然存在的天然放射性同位素和人工制造的人工放射性同位素两种。现在工、农、医诸方面使用的放射性核素,大部分是人工制造的。天然放射性核素,如镭 - 226

(^{226}Ra)、铀-235 (^{235}U) 和钍-232 (^{232}Th) 等，也要经过人工提纯后才能使用。

放射性核素有三个重要特点，它们是：

①能自发地放出射线，与此同时，衰变成别的核素。射线一般有 α 、 β 、 γ 三种，有时又依次称为甲种射线、乙种射线和丙种射线。一种核素衰变时，不一定都能放出这三种射线；质量较轻的同位素一般只放出 β 、 γ 射线，质量较重的放射性同位素，多数能放出 α 射线。

α 射线穿透能力很弱，一张纸便可以挡住。但其能量容易传递给物质，所以要特别注意防止放出这类射线的放射性物质进入体内。

β 射线就是高速运动的电子，穿透能力比 α 射线强，但不太厚的铝片便可以把它挡住。

γ 射线是不带电的光子，其性质与医院里透视用的 X 射线相似，但穿透能力比 X 射线强得多，比 α 、 β 射线更强。 γ 射线一般采用比重大的材料，像铁、铅等屏蔽它。 γ 射线与物质作用时，能量损失很小。

②有一定的半衰期（半衰期记作 $T_{1/2}$ ）。某种放射性核素放射出一种或一种以上射线并衰变为别的核素的过程中，其放射性活度（单位时间内发生的核衰变数）不断减小。一定数量的某放射性核素的原子数目衰减到它的初始值的一半所需的时间长度称为该放射性核素的半衰期。半衰期是放射性核素的一个特征常数，不随外界条件和元素的物理化学状态的不同而改变。不同放射性核素半衰期的长短差别很大，长的可达几十亿年以上，如钍-232 为 140 亿年；短的在百分之一秒以下，如钋-212 仅为 3.0×10^{-7} 秒，即一千万分之三秒。

③放射性原子核数目的减少服从指数规律。放射性衰变的规律可用下式表示：

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.1)$$

其中 N_0 为初始的放射性原子核数, λ 是与该种放射性核素性质有关的常数, 称为衰变常数; N 为经过 t 时间衰变后所剩下的放射性原子核数。上式中 $N = \frac{N_0}{2}$ 时, 即可求得半衰期 $T_{1/2}$ 与 λ 的关系:

$$t = T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

故 (1.1) 式也可表达成:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}}} \quad (1.2)$$

当 N_0 为已知, 欲求经过时间 t 后的 N 值时, 可先计算 $x = 0.693t/T_{1/2}$ 的值, 然后查表 (见附录十二) 得 e^{-x} 值, 再与 N_0 相乘得到。这里需要注意的是, t 与 $T_{1/2}$ 所用的时间单位必须相同。

2. 放射性活度

放射性核素在单位时间内发生衰变的原子核的数目称为放射性活度 (即衰变率), 用符号 A 表示, 它决定于该放射性核素的性质 (λ 或 $T_{1/2}$) 和存在的放射性原子核的数目 N , 即 $A = \lambda N$ 。放射性活度是以衰变率来度量放射性核素数量的物理量, 目前常用的单位是居里, 符号为 Ci。1 居里的活度是指每秒钟发生衰变的放射性原子核的数目为 3.7×10^{10} 个。居里的单位太大了, 实际工作中常用 10^{-3} 居里 (mCi)、 10^{-6} 居里 (μ Ci)、 10^{-9} 居里 (nC) 及 10^{-12} 居里 (pCi) 来计量。

1977 年国际放射防护委员会发表的建议书 (ICRP 第 26 号出版物) 中, 根据国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 的建议, 对放射性活度、照射量、吸收剂量和剂量当量等的计量单位采用了国际单位制。现在国外已逐步采用了这些新单位。新单位中对放射性活度的单位改用贝可 (Becquerel), 符号为 Bq。1 贝可为

每秒钟发生 1 次衰变，即 $1\text{Bq} = 1 \text{ 秒}^{-1}$ 。因此， $1 \text{ 居里} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 秒}^{-1} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 贝可}$ 。

实际工作中也常用比放射性这一名称，符号有 C ，它是指每单位质量的固体物质或每单位体积的液体中所含的放射性活度。任何 1 克放射性核素的放射性活度 C （居里/克）与该核素的半衰期 $T_{1/2}$ （天）、原子量 A 之间有下列关系：

$$C = \frac{1.3 \times 10^8}{A \cdot T_{1/2}} \quad (1.3)$$

很明显，放射性活度等于 1 居里（ 3.7×10^{10} 贝可）的放射性核素，其质量为：

$$g = \frac{1}{C} = 7.7 \times 10^{-9} A T_{1/2} \quad (1.4)$$

上式中质量 g 以克为单位，半衰期 $T_{1/2}$ 以天为单位。采用其他单位时，应注意换算。

表 1-1 列出了几种常用 γ 核素每居里（ 3.7×10^{10} 贝可）的克镭当量数。克镭当量这个单位，由于其数值与测量条件等密切相关而某确定条件下的定量数值又很难得到，所以没有得到国际公认。但在我国由于历史的原因不少地方仍在使用，故这里作一简单介绍。克镭当量是用 γ 辐射效应（ γ 当量）描述放射性活度的一个物理量单位，符号用 gRa 表示。实际使用中常取它的千分之一，即毫克镭当量（ mgRa ）来计量。1 毫克镭（与衰变产物达到平衡）的放射源，放出的 γ 射线通过 0.5 毫米厚的铂板初滤后，在空气中距源 1 厘米处的照射量率为 8.25 伦/小时。因此，当任何放出 γ 射线的放射性物质，在距它 1 厘米地方的照射量率等于 8.25 伦/小时，它辐射的 γ 射线量也就相当于 1 毫克镭，称其放射性活度为 1 毫克镭当量。由此可知，居里和克镭当量是两个不同的单位，镭当量的单位只能用于发射 γ 射线的放射源。