

辐射安全手册

潘自强 主编



科学出版社

辐射安全手册

潘自强 主 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书涉及辐射防护和辐射安全的方方面面,共包括 13 章和 9 个附录,1~4 章为有关辐射安全的基础知识,其他 9 章为实用的辐射安全技术和要求。本书主要以表格和条目的形式编写,包含大量的数据信息,兼具权威性和实用性,可供在核电站、核燃料循环、核与辐射技术应用和可能存在人为活动引起辐射水平升高的工业、科研等活动中从事辐射安全工作的技术人员和研究人员参考,也可供从事核与辐射相关专业的教师、政府工作人员和环境保护工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

辐射安全手册 / 潘自强主编. —北京:科学出版社,2011. 11

ISBN 978-7-03-032550-1

I. 辐… II. 潘… III. 辐射防护-手册 IV. TL7-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 209182 号

责任编辑:沈红芬 / 责任校对:包志虹

责任印制:刘士平 / 封面设计:范璧合

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 11 月第一次印刷 印张:28 1/4

印数:1—2 500 字数:700 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《辐射安全手册》编写人员

主 编 潘自强

副 主 编 夏益华

编 委 会 (按姓氏笔画排序)

白 光 刘新华 夏益华 康玉峰 潘自强

编写人员 (按姓氏笔画排序)

白 光 刘新华 刘福东 孙全富 杨茂春

杨俊武 张庆利 张建岗 赵兰才 夏益华

徐勇军 康玉峰 廖运璇 潘自强

前 言

近年来,我国核电和核与辐射技术应用取得了较大发展,今后还可能有更大的发展。在核设施、辐射装置和放射性核素实验等的选址、设计、运行和退役中都会遇到大量辐射安全问题。我国辐射安全管理和研究也取得了一些新的成果。另外,在辐射安全理念和技术方面,又有许多新的进展,国际放射防护委员会发布了“国际放射防护委员会 2007 年建议书”。在这种情况下,我们编写了这本《辐射安全手册》。

《辐射安全手册》全书包括 13 章和 9 个附录。1~4 章为有关辐射安全的基础知识,其他 9 章为实用的辐射安全技术和要求。

近些年,核与辐射技术在医学领域的应用得到了较快的发展,放射诊断和放射治疗以及核医学在诊断和治疗中得到了更为广泛的应用,我国公众所受医学照射已成为除天然辐射照射外的最大者,一些发达国家则已超过天然辐射。因此,手册中专门有一章“医学应用中的辐射防护”,提请大家关注医疗照射的防护问题。

人为活动引起的天然照射的升高是近年来广为关注的另一问题,近 20 年来,我国居民室内氡浓度明显升高,提高了氡在我国公众天然辐射照射中的份额。为此,在《辐射安全手册》中专列了“人为活动引起的天然照射增加”这一章。

《辐射安全手册》在数据和资料选取上,我们考虑的原则是:

(1) 对于基础资料,尽可能采用新的数据,例如对用于剂量计算的核衰变数据,我们采用了国际放射委员会 2008 年出版的国际放射防护委员会第 107 号出版物“用于剂量计算的核衰变数据”。有关辐射效应的资料主要取自国际放射防护委员会第 103 号“国际放射委员会 2007 年建议书”和联合国原子辐射效应科学委员会 2006 年和 2008 年报告。

(2) 对于实用的辐射安全规定和要求,均引用国内的最新规定和要求,但同时也列出国际上的一些新的要求,例如工作场所和室内氡浓度的标准,同时列出了国际放射防护委员会 2009 年关于氡浓度标准的声明。对于辐射防护测量仪器的要求,有些方面我国尚无明确规定,因此引用了国际电工组织(IEC)等国际组织的要求。

(3) 对辐射水平现状的数据基本上采用国内的资料,但同时也列出了世界范围内的一些主要数据。

本书数据较多,又来自多种文献,部分数据保留了非法定单位。一是担心改动带来的错乱,二也考虑到职业习惯。但书末附有相应的物理量换算关系表,供读者换算。

编写《辐射安全手册》时,我们设想的主要读者对象是:在核电站、核燃料循环、核与辐射技术应用和可能存在人为活动引起辐射水平升高的工业、科研等活动中从事辐射安全工作的技术人员和研究人员,但本书对核与辐射相关专业的教师、政府工作人员和环境保护工作者也有一

定的参考价值。

《辐射安全手册》的出版得到了中国核工业集团公司、中国广东核电集团公司、环境保护部核与辐射安全中心、中国原子能科学研究院、中国辐射防护研究院和中国疾控中心辐射防护与核安全所的支持,在此表示衷心的感谢。

《辐射安全手册》涉及辐射防护和辐射安全的方方面面,编者的知识面和深度均有所限制,不免使本书存在一些问题和不足,敬望读者提出意见。

潘自强
2011年5月

目 录

前言

1 物理量、辐射防护量和运行实用量	(1)
1.1 物理量	(1)
1.2 防护量	(1)
1.3 运行实用量	(5)
参考文献	(7)
2 放射性及环境辐射水平	(8)
2.1 放射性	(8)
2.2 天然环境辐射水平	(39)
2.3 人工环境辐射水平	(42)
参考文献	(48)
3 辐射与物质相互作用	(49)
3.1 光子与物质相互作用	(49)
3.2 带电粒子与物质相互作用	(69)
3.3 某些物质的相关特性	(71)
参考文献	(74)
4 电离辐射生物效应、参考人和参考生物	(76)
4.1 辐射效应	(76)
4.2 参考人	(91)
4.3 参考生物	(104)
参考文献	(106)
5 实用公式及数据	(108)
5.1 α 粒子和质子	(108)
5.2 β 粒子和电子束	(108)
5.3 韧致辐射	(110)
5.4 γ 剂量率	(110)
5.5 非点状 γ 源在空气中比释动能率	(111)
5.6 空气取样	(112)
5.7 计数器分辨时间(死时间)	(112)
5.8 测量的几何因子	(113)
5.9 放射性衰变公式	(122)
5.10 观测数据的几种平均值及误差	(124)
5.11 泊松分布及其标准差	(126)
5.12 判断限和探测限	(126)

5.13 光子、中子、电子照射到剂量的转换	(126)
参考文献	(132)
6 外照射及屏蔽	(133)
6.1 外照射的屏蔽原则	(133)
6.2 γ 射线及屏蔽	(135)
6.3 X 射线及屏蔽	(147)
6.4 中子屏蔽	(150)
6.5 某些混凝土的屏蔽特性	(155)
参考文献	(157)
7 中子产生及中子活化	(158)
7.1 中子分类	(158)
7.2 中子源	(158)
7.3 中子活化	(161)
参考文献	(173)
8 辐射防护测量仪器	(175)
8.1 辐射防护监测的目的、分类和仪器选择	(175)
8.2 个人监测	(181)
8.3 场所监测	(187)
8.4 环境监测	(196)
8.5 流出物监测	(199)
8.6 退役监测	(204)
8.7 清洁解控监测	(211)
8.8 辐射安保监测	(215)
8.9 辐射防护仪器校准	(218)
参考文献	(222)
9 医学应用中的辐射防护	(224)
9.1 安全与防护的责任	(224)
9.2 医疗照射的正当性判断	(225)
9.3 医用辐射防护的最优化	(225)
9.4 放射诊断指导水平	(246)
9.5 抚育者、照顾者与生物医学研究中志愿者的剂量约束	(249)
9.6 接受放射性核素治疗的患者出院	(249)
9.7 事故性照射的预防与处置	(250)
参考文献	(251)
10 运行辐射防护	(253)
10.1 个人剂量控制	(253)
10.2 表面污染控制水平	(255)
10.3 氦、氩及其子体的控制限值	(255)
10.4 内、外照剂量转换因子	(257)
10.5 放射性核素的毒性分组和非密封源工作场所的分级和控制	(288)

10.6	放射源	(290)
10.7	放射性物质运输	(295)
10.8	核设施辐射防护最优化	(310)
10.9	核临界安全	(313)
10.10	职业照射水平	(320)
	参考文献	(322)
11	辐射环境保护及放射性废物管理	(323)
11.1	剂量约束值	(323)
11.2	气态和液态流出物排放控制	(324)
11.3	环境影响评价中典型环境转移参数	(330)
11.4	流出物监测和环境监测	(339)
11.5	放射性废物处理处置	(345)
11.6	退役和环境整治	(354)
	参考文献	(358)
12	人为活动引起的天然照射增加	(359)
12.1	人为活动引起天然照射增加所涉及的范围	(359)
12.2	各行业辐射水平及剂量	(359)
12.3	人为活动引起天然放射性明显增加(NORM)的管理	(380)
	参考文献	(384)
13	核与辐射事故应急	(386)
13.1	核与辐射事件分级	(386)
13.2	应急照射情况下的干预	(387)
13.3	核与辐射应急计划和准备	(389)
13.4	应急响应	(393)
13.5	核与辐射恐怖袭击事件应急	(400)
13.6	核设施的实物保护	(401)
13.7	IAEA 核与辐射应急的要求	(403)
13.8	典型核与辐射事故回顾	(406)
	附录 放射性物质的危险量	(407)
	参考文献	(409)
	附录 1 核与辐射安全和环境保护法律、条例	(411)
	附录 2 辐射安全和环境保护常用标准	(413)
	附录 3 联合国原子辐射影响科学委员会(UNSCEAR)报告	(417)
	附录 4 国际放射防护委员会(ICRP)出版物及其中译本	(419)
	附录 5 辐射安全术语	(427)
	附录 6 辐射防护常用物理量换算关系	(438)
	附录 7 基本物理常数	(439)
	附录 8 用于构成十进倍数和分数单位的词头	(440)
	附录 9 元素周期表	(441)

1

物理量、辐射防护量和运行实用量

1.1 物理量

- 半衰期(half-life)

半衰期为放射性原子核数目衰减到原来数目的一半所需的时间,用 $T_{1/2}$ 表示。与它关系密切的量是衰变常数 λ ,它表示放射性原子核在单位时间内发生衰变的概率,其倒数就是放射性原子核的平均寿命。半衰期和衰变常数的关系是

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

- 活度(activity)

在给定时刻处于某给定能态的一定量的某种放射性核素的活度 A 定义为

$$A = \frac{dN}{dt}$$

式中: dN 为在时间间隔 dt 内该核素从该能态发生自发核跃迁数目的期望值。活度的 SI 单位是秒的倒数(1/s),称为贝可[勒尔](Bq)。

- 比释动能(Kerma)

比释动能 K 定义为

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

式中: dE_{tr} 为不带电电离粒子在质量为 dm 的某一物质内释出的全部带电粒子的初始动能的总和。比释动能的 SI 单位是焦耳每千克(J/kg),称为戈[瑞](Gy)。

- 注量(fluence, φ)

注量 φ 定义为在给定时间间隔内进入以空间某点为中心的适当小球体的粒子数除以该球体的最大截面积得到的商,即

$$\varphi = \frac{dN}{da}$$

- 吸收剂量(absorbed dose)

吸收剂量 D 是一个基本的剂量学量,定义为

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

式中: $d\bar{\epsilon}$ 为电离辐射授予某一体积元中的物质的平均能量; dm 为在这个体积元中的物质的质量。

能量可以对任何确定的体积加以平均,平均剂量等于授予该体积的总能量除以该体积的质量而得到的商。吸收剂量的 SI 单位是焦耳每千克(J/kg),称为戈[瑞](Gy)。

1.2 防护量

当量剂量和有效剂量等防护量只适用于描述随机效应,不应当用来定量描述较高的辐射剂

量,或者用于需要对有关组织反应(确定效应)进行任何治疗方面的决策。用于描述确定效应时,应当用吸收剂量(以戈瑞为单位, Gy)来评估剂量,而涉及高 LET 辐射(即中子或 α 粒子)时,则应当采用适当的 RBE 加权的吸收剂量。

各个剂量学量的相互关系见图 1.1。

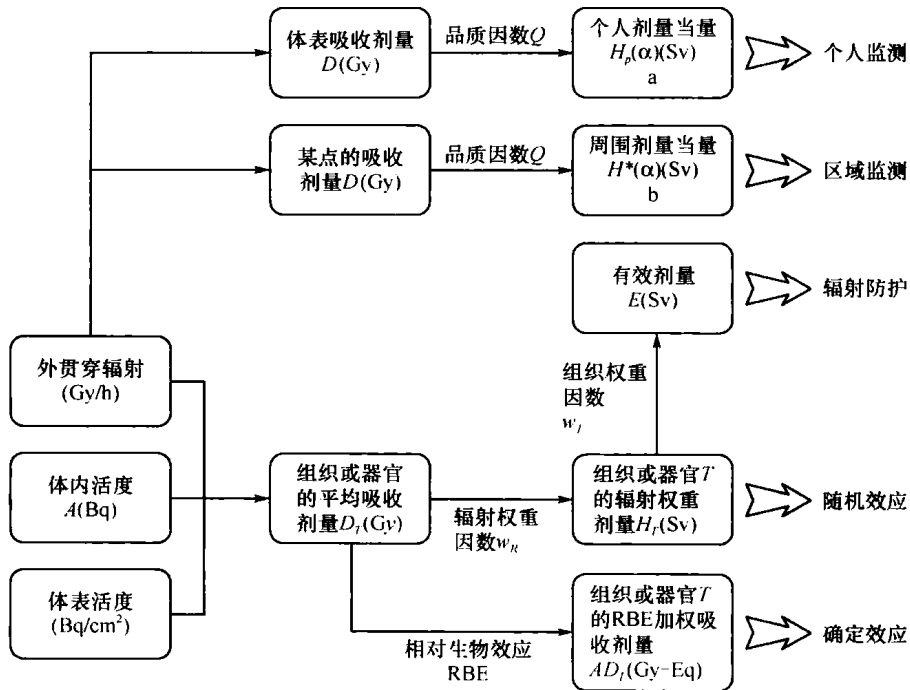


图 1.1 剂量学量和它们的应用示意图

a. 在体表下某一点; b. 在 ICRU 球模内某点

• **当量剂量** (equivalent dose)(GB18871-2002)

当量剂量 $H_{T,R}$ 定义为

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$$

式中: $D_{T,R}$ 为辐射 R 在器官或组织 T 内产生的平均吸收剂量; w_R 为辐射 R 的辐射权重因数。

当辐射场是由具有不同 w_R 值的不同类型的辐射所组成时, 当量剂量为

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

当量剂量的单位是 J/kg, 称为希[沃特](Sv)。

• **辐射权重因数** (radiation weighting factor)

(1) 由国家标准(GB18871-2002)给出的辐射权重因数: 为辐射防护目的, 对吸收剂量乘以的因数(如表 1.1 所示), 用以考虑不同类型辐射的相对危害效应(包括对健康的危害效应)。

如果需要使用连续函数计算中子的辐射权重因数, 则可使用下列近似公式:

$$w_R = 5 + 17 \exp\{-[\ln(2E)]^2 / 6\}$$

式中: E 为中子的能量(以 MeV 为单位)。

对于未包括在表 1.1 中的辐射类型和能量, 可以取 w_R 等于 ICRU 球中 10mm 深处的 \bar{Q} 值, 并可由下式求得:

$$\bar{Q} = \frac{1}{D} \int_0^D Q(L) D_L dL$$

式中: D 为吸收剂量; D_L 为 D 随 L 的分布; $Q(L)$ 为 ICRP-60 号出版物中规定的水中非受限传能线密度为 L 时的辐射品质因数。

$Q-L$ 关系式如表 1.2 所示。

表 1.1 辐射权重因数

辐射的类型及能量范围	辐射权重因数 w_R
光子, 所有能量	1
电子及介子, 所有能量 ^a	1
中子, 能量 < 10keV	5
10~100keV	10
100keV~2MeV	20
2~20MeV	10
>20MeV	5
质子(不包括反冲质子), 能量 > 2MeV	5
α 粒子、裂变碎片、重核	20

a. 不包括由原子核向 DNA 发射的俄歇电子, 此种情况下需进行专门的微剂量测定考虑。

表 1.2 $Q-L$ 关系式

水中的非受限传能 线密度 L (keV/ μ m)	$Q(L)$ ^a
≤ 10	1
10~100	$0.32L - 2.2$
≥ 100	$300/\sqrt{L}$

a. L 的单位是 keV/ μ m。

(2) 由 ICRP 第 103 号报告书(ICRP 103, 2008)给出的不同辐射类型的辐射权重因数 w_R 如表 1.3 所示, 中子的辐射权重因数 w_R 与中子能量的关系见表 1.3 和图 1.2。

表 1.3 不同辐射类型的辐射权重因数

辐射类型	辐射权重因数
光子	1
电子和 μ 介子	1
质子和带电 π 介子	2
α 粒子, 裂变碎片, 重核	20
中子	公式:

$$w_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2 \exp\{-[\ln(E_n)]^2/6\}, & E_n < 1\text{MeV} \\ 5.0 + 17.0 \exp\{-[\ln(2E_n)]^2/6\}, & 1\text{MeV} \leq E_n \leq 50\text{MeV} \\ 2.5 + 3.25 \exp\{-[\ln(0.04E_n)]^2/6\}, & E_n > 50\text{MeV} \end{cases}$$

或图 1.2

• 有效剂量 (effective dose)(GB18871-2002)

有效剂量 E 被定义为人体各组织或器官的当量剂量乘以相应的组织权重因数后的和, 即

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

式中: H_T 为组织或器官 T 所受当量剂量; w_T 为组织或器官 T 的组织权重因数。

由当量剂量的定义, 可以得到

$$E = \sum_T w_T \cdot \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

式中: w_R 为辐射 R 的辐射权重因数; $D_{T,R}$ 为

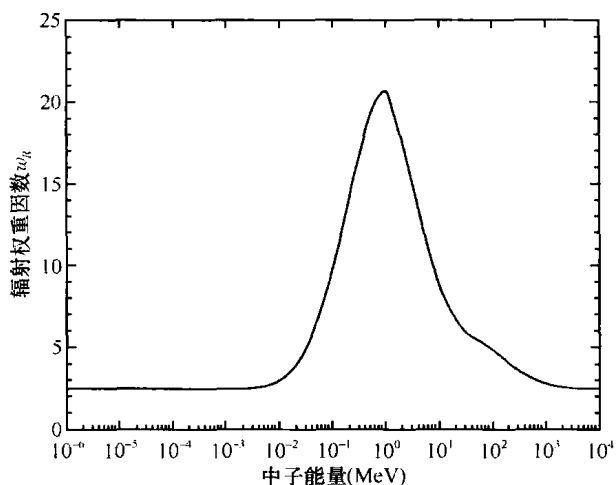


图 1.2 中子的辐射权重因数 w_R 与中子能量的关系

组织或器官 T 内的平均吸收剂量。有效剂量的单位是 J/kg , 称为希[沃特](Sv)。

• 组织权重因数 (tissue weighting factor)

(1) 由国家标准(GB18871-2002)给出的组织权重因数: 为辐射防护的目的, 器官或组织的当量剂量所乘以的因数(表 1.4), 乘以该因数是为了考虑不同器官或组织对发生辐射随机性效应的不同敏感性。

表 1.4 组织或器官的组织权重因数 w_T

组织或器官	组织权重因数 w_T	组织或器官	组织权重因数 w_T
性腺	0.20	肝	0.05
(红)骨髓	0.12	食道	0.05
结肠 ^a	0.12	甲状腺	0.05
肺	0.12	皮肤	0.01
胃	0.12	骨表面	0.01
膀胱	0.05	其余组织或器官 ^b	0.05
乳腺	0.05		

a. 结肠的权重因数适用于在大肠上部和下部肠壁中当量剂量的质量平均。

b. 进行计算时, 表中其余组织或器官包括肾上腺、脑、外胸区域、小肠、肾、肌肉、胰、脾、胸腺和子宫。在上述其余组织或器官中有一个组织或器官受到超过 12 个规定了权重因数的器官的最高当量剂量的例外情况下, 该组织或器官应取权重因数 0.025, 而余下的上列其余组织或器官所受的平均当量剂量亦应取权重因数 0.025。

(2) 由 ICRP 第 103 号报告书(ICRP 103, 2008)给出的组织权重因数(表 1.5):

表 1.5 ICRP103 给出的组织权重因数 w_T

组织或器官	w_T	$\sum w_T$
(红)骨髓、结肠、肺、胃、乳腺	0.12	0.72
其余组织 ^a		
性腺	0.08	0.08
膀胱、食管、肝、甲状腺	0.04	0.16
骨表面、脑、唾液腺、皮肤	0.01	0.04

a. 其余组织: 肾上腺、外胸(ET)区、胆囊、心脏、肾、淋巴结、肌肉、口腔黏膜、胰腺、前列腺(♂)、小肠、脾、胸腺、子宫/子宫颈(♀)。对其余组织的 w_T (0.12) 是应用于上述 14 个器官和组织的算术平均剂量。

• 集体剂量 (collective dose)(GB18871-2002)

集体剂量是群体所受总辐射剂量的一种表示, 定义为在某一时段内受某一辐射源照射的群体的成员数与他们所受的平均辐射剂量的乘积。集体剂量用人·希[沃特](人·Sv)表示。集体剂量包括与组织或器官剂量相关的集体当量剂量 S_T , 以及集体有效剂量 S 。

由处在 E_1 和 E_2 之间的个人有效剂量所相应的集体有效剂量定义如下:

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \frac{dN}{dE} dE$$

式中: $\frac{dN}{dE} dE$ 为所受有效剂量处在 E 和 $E + dE$ 之间的人员数目; ΔT 为对其间的有效剂量求和的时间段。

ICRP 第 103 号报告书(ICRP103,2008)提出集体剂量只能作为辐射防护优化、不同辐射防护方法和防护程序之间进行比较的工具,不能用于流行病学危险评价中的危险预估,特别不能作为计算受到极低照射的大规模人群中癌症死亡数的基础。

集体剂量的计算要防止信息的不适当凝并(例如,非常低的个人剂量在很长的时间段和很宽广的地域内不加分组地凝并)。

• **待积剂量** (committed dose)(GB18871-2002)

待积剂量是待积有效剂量和(或)待积当量剂量的简称。

• **待积吸收剂量** (committed absorbed dose)(GB18871-2002)

待积吸收剂量 $D(\tau)$ 定义为

$$D(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{D}(t) dt$$

式中: t_0 为摄入放射性物质的时刻; $\dot{D}(t)$ 为 t 时刻的吸收剂量率; τ 为摄入放射性物质之后经过的时间。

未对 τ 加以规定时,对成年人 τ 取 50 年;对儿童的摄入要算至 70 岁。

• **待积当量剂量** (committed equivalent dose)(GB18871-2002)

待积当量剂量 $H_T(\tau)$ 定义为

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T(t) dt$$

式中: t_0 为摄入放射性物质的时刻; $\dot{H}_T(t)$ 为 t 时刻器官或组织 T 的当量剂量率; τ 为摄入放射性物质之后经过的时间。

未对 τ 加以规定时,对成年人 τ 取 50 年;对儿童的摄入要算至 70 岁。

• **待积有效剂量** (committed effective dose)(GB18871-2002)

待积有效剂量 $E(\tau)$ 定义为

$$E(\tau) = \sum_T w_T \cdot H_T(\tau)$$

式中: $H_T(\tau)$ 为积分至 τ 时间时器官或组织 T 的待积当量剂量; w_T 为器官或组织 T 的组织权重因数。

未对 τ 加以规定时,对成年人 τ 取 50 年;对儿童的摄入则要算至 70 岁。

• **器官剂量**(organ dose)(GB18871-2002)

人体某一特定器官或组织 T 内的平均剂量 D_T ,由下式给出:

$$D_T = (1/m_T) \int_{m_T} D dm$$

式中: m_T 为器官或组织 T 的质量; D 为质量元 dm 内的吸收剂量。

• **剂量当量**(dose equivalent)(GB18871-2002)

国际辐射单位与测量委员会(ICRU)所使用的一个量,用以定义实用量:周围剂量当量、定向剂量当量和个人剂量当量。组织中某点处的剂量当量 H 是 D 、 Q 和 N 的乘积,即

$$H = DQN$$

式中: D 为该点处的吸收剂量; Q 为辐射的品质因数; N 为其他修正因数的乘积。

1.3 运行实用量

1.3.1 区域监测运行实用量(GB18871-2002)

• **周围剂量当量** (ambient dose equivalent)

辐射场中某点处的周围剂量当量 $H^*(d)$ 定义为相应的扩展齐向场在 ICRU 球内逆齐向场的半径上深度 d 处所产生的剂量当量。对于强贯穿辐射, 推荐 $d=10\text{mm}$ 。

· 定向剂量当量 (directional dose equivalent)

辐射场中某点处的定向剂量当量 $H'(d, \Omega)$ 是相应的扩展场在 ICRU 球体内、沿指定方向 Ω 的半径上深度 d 处产生的剂量当量。对弱贯穿辐射, 推荐 $d=0.07\text{mm}$ 。

1.3.2 个人监测运行实用量(GB18871-2002)

· 个人剂量当量 (personal dose equivalent)

人体某一指定点下面适当深度 d 处的软组织内的剂量当量 $H_p(d)$, 这一剂量当量既适用于强贯穿辐射, 也适用于弱贯穿辐射。对强贯穿辐射, 推荐深度 $d=10\text{mm}$; 对弱贯穿辐射, 推荐深度 $d=0.07\text{mm}$ 。

1.3.3 有关氡或钍射气的量

· 氡或钍射气的照射量(GB18871-2002)

氡或钍射气的照射量 (E_{Rn} 或 E_{Th}) 定义为氡或钍射气的活度浓度与照射时间的乘积, 即

$$E_{Rn} \text{ (或 } E_{Th}) = \bar{C}_{Rn} \text{ (或 } \bar{C}_{Th}) \cdot T$$

式中: E_{Rn} (或 E_{Th}) 为氡(或钍射气)照射量, $\text{Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3$; \bar{C}_{Rn} (或 \bar{C}_{Th}) 为受照期间空气中氡(或钍射气)的平均活度浓度, Bq/m^3 ; T 为受照时间, 单位 h, 按国家标准(GB18871-2002)的推荐, 全年受照时间, 对工作场所 $T=2000\text{h}$; 居室 $T=7000\text{h}$ 。

· 氡或钍射气子体的 α 潜能浓度 C_p 及其照射量 E_p (潘自强, 2007)

(1) α 潜能浓度: 用于描述氡(或钍射气)的危害大小, α 潜能浓度 C_p 等于单位体积空气中存在的短寿命氡(或钍射气)子体的全部子体原子在衰变到 ^{210}Pb (RaD) (对钍射气是 ^{208}Pb) 的过程中所发射出的总 α 粒子能量, 即单位体积空气中短寿命氡(或钍射气)子体的 α 潜能总和, 因此有

$$C_p = \sum_i C_i \cdot \epsilon_{p_i} / \lambda_i$$

式中: C_i 为第 i 种原子在空气中的放射性活度浓度, Bq/m^3 ; i 为 a, b, \dots ; $\epsilon_{p_i} / \lambda_i$ 为第 i 种原子每贝可勒尔放射性的 α 潜能, J。

计算氡子体的 α 潜能浓度 C_p 时, 由于 ^{214}Po 寿命太短, 可忽略, 只需考虑 ^{218}Po 、 ^{214}Pb 和 ^{214}Bi 三项即可, 即

$$C_p = 0.578C_a + 2.86C_b + 2.096C_c \quad (\mu\text{J}/\text{m}^3)$$

式中: C_a 、 C_b 和 C_c 分别为空气中 ^{218}Po 、 ^{214}Pb 和 ^{214}Bi 的放射性浓度, Bq/m^3 。 α 潜能浓度 C_p 的 SI 单位为 J/m^3 , 专用单位有 MeV/L 和“工作水平”(WL)。

(2) 照射量: 氡(或钍射气)子体的照射量是它们的 α 潜能浓度对照射时间的积分, 即

$$E_p = \int_0^T C_p(t) dt \quad \text{(或分时间段求和: } E_p = \sum_i C_{p_i} \cdot T_i)$$

式中: $C_p(t)$ 为 α 潜能浓度随时间的分布, J/m^3 ; T 为人员受照时间, h。

子体照射量(α 潜能照射量)的 SI 单位为 $\text{J} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

· 工作水平 (working level, WL) (GB18871-2002)

工作水平是氡(或钍射气)子体引起的 α 潜能浓度的非 SI 单位 (WL), 相当于每升空气中发射出的 α 粒子能量为 $1.3 \times 10^5 \text{MeV}$ 。在 SI 单位中, 1WL 对应于 $2.1 \times 10^{-5} \text{J}/\text{m}^3$ 。

• 工作水平小时(working level hour, WLH)和工作水平月(working level month, WLM)(GB18871-2002)

工作水平小时或工作水平月是氡(或钍射气)子体照射量的非 SI 单位,定义为工作水平与受照射时间的乘积。

$$1\text{WLM}=170\text{WLH}(\text{相当于 } 3.54\text{mJ} \cdot \text{h}/\text{m}^3)$$

(夏益华 徐勇军 编写,刘新华 审阅)

参 考 文 献

潘自强. 2007. 电离辐射环境监测与评价. 北京:原子能出版社

GB18871-2002. 中华人民共和国国家标准·电离辐射防护与辐射源安全基本标准

ICRP 74. 1997. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann ICRP, 26(3)

ICRP 103. 2008. 国际放射防护委员会 2007 年建议书. 潘自强等译. 北京:原子能出版社

2.1 放射性

本节汇编了辐射安全中常用的放射性数据表,包括常用核素的半衰期及比活度(表 2.1),按 α 射线能量分组的常用 α 放射性核素(表 2.2),常用 β 放射性核素及其能量(表 2.3),不同元素发射的 X 射线能量(表 2.4),常用核素的半衰期、衰变类型和衰变子体(表 2.5),四个放射性衰变链(表 2.6~表 2.9),宇生放射性核素在大气层中的产生率及浓度(表 2.10)和不同富集度铀同位素丰度及比活度(表 2.11)。富集铀中的同位素组成取决于铀同位素分离方式以及天然铀的来源,有些天然铀中含有 ^{236}U ,因此表 2.11 中的同位素组成仅供参考。

表 2.1 常用核素的比活度

核素	半衰期	比活度 (TBq/g)	核素	半衰期	比活度 (TBq/g)	核素	半衰期	比活度 (TBq/g)
^3H	12.32a	$3.58\text{E}+02^a$	^{55}Fe	2.737a	$8.79\text{E}+01$	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.015h	$1.95\text{E}+05$
^{11}C	20.39min	$3.10\text{E}+07$	^{59}Fe	44.495d	$1.84\text{E}+03$	^{103}Ru	39.26d	$1.19\text{E}+03$
^{14}C	5700a	$1.66\text{E}-01$	^{57}Co	271.74d	$3.12\text{E}+02$	^{106}Ru	373.59d	$1.22\text{E}+02$
^7Be	53.22d	$1.30\text{E}+04$	^{59}Ni	$1.01\text{E}+05\text{a}$	$2.22\text{E}-03$	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	249.76d	$1.76\text{E}+02$
^{13}N	9.965min	$5.37\text{E}+07$	^{60}Co	5.2713a	$4.18\text{E}+01$	^{110}Ag	24.6s	$1.54\text{E}+08$
^{16}N	7.13s	$3.66\text{E}+09$	^{63}Ni	100.1a	$2.10\text{E}+00$	^{123}I	13.27h	$7.10\text{E}+04$
^{18}F	109.77min	$3.52\text{E}+06$	^{65}Ni	2.51719h	$7.09\text{E}+05$	^{125}I	59.4d	$6.51\text{E}+02$
^{22}Na	2.6019a	$2.31\text{E}+02$	^{64}Cu	12.7h	$1.43\text{E}+05$	^{129}I	$1.57\text{E}+07\text{a}$	$6.54\text{E}-06$
^{24}Na	14.959h	$3.23\text{E}+05$	^{65}Zn	244.06d	$3.05\text{E}+02$	^{131}I	8.0207d	$4.60\text{E}+03$
^{32}P	14.263d	$1.06\text{E}+04$	^{72}Ga	14.1h	$1.14\text{E}+05$	^{132}Te	76.896h	$1.14\text{E}+04$
^{35}S	87.51d	$1.58\text{E}+03$	^{76}As	25.8672h	$5.90\text{E}+04$	^{132}I	2.295h	$3.83\text{E}+05$
^{36}Cl	$3.01\text{E}+05\text{a}$	$1.22\text{E}-03$	^{82}Br	35.3h	$4.01\text{E}+04$	^{133}I	20.8h	$4.19\text{E}-04$
^{41}Ar	1.827h	$1.55\text{E}+06$	^{86}Rb	18.642d	$3.01\text{E}+03$	^{133}Xe	5.243d	$6.93\text{E}+03$
^{40}K	$1.251\text{E}+09\text{a}$	$2.65\text{E}-07$	^{89}Sr	50.53d	$1.07\text{E}+03$	^{133}Te	12.5min	$4.18\text{E}+06$
天然钾	—	$3.09\text{E}-11$	^{90}Sr	28.79a	$5.11\text{E}+00$	^{135}I	6.57h	$1.31\text{E}+05$
^{42}K	12.36h	$2.23\text{E}+05$	^{90}Y	64.1h	$2.01\text{E}+04$	^{133}Ba	10.52a	$9.46\text{E}+00$
^{45}Ca	162.67d	$6.60\text{E}+02$	^{92}Sr	2.66h	$4.74\text{E}+05$	^{134}Cs	2.0648a	$4.78\text{E}+01$
^{46}Sc	83.79d	$1.25\text{E}+03$	^{92}Y	3.54h	$3.56\text{E}+05$	^{136}Cs	13.16d	$2.70\text{E}+03$
^{51}Cr	27.7025d	$3.42\text{E}+03$	^{95}Zr	64.032d	$7.94\text{E}+02$	^{137}Cs	30.1671a	$3.20\text{E}+00$
^{54}Mn	312.12d	$2.87\text{E}+02$	^{95}Nb	34.991d	$1.45\text{E}+03$	$^{137\text{m}}\text{Ba}$	2.552min	$1.99\text{E}+07$
^{56}Mn	2.5789h	$8.03\text{E}+05$	^{99}Mo	65.94h	$1.78\text{E}+04$	^{140}Ba	12.752d	$2.71\text{E}+03$