

1
FUSHE
FANGHU
SHOUCE

辐射防护手册

第一分册

辐射源与屏蔽

原子能出版社

内 容 简 介

本书是针对辐射源的应用和防护设计的需要而编写的，是计划陆续出版的较完整的辐射防护手册中的一个分册。本书包括辐射源和屏蔽两大部分。辐射源部分中介绍了放射性核素、反应堆、低能加速器和X射线等辐射源的辐射特性、数据及各类源的特点；屏蔽部分主要介绍 γ 射线屏蔽计算、中子屏蔽计算、反照率计算、贯穿辐射和漏束计算及各种实用电离辐射源的屏蔽计算。本书的特点是取材广泛、内容丰富而精练，能为读者提供较为系统的计算方法和配套数据。书后附法定单位和传统专用单位换算表。

本书可供各种电离辐射源的使用者、设计者和维修者以及辐射防护工作者实际应用，也可供大专院校有关专业师生参考。

辐射防护手册（第一分册）

辐射源与屏蔽

主编 李德平 潘自强

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

国防科工委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张30.75·字数630千字
1987年8月北京第一版·1987年8月北京第一次印刷
印数1—1700·统一书号：15175·766
定价：8.20元

前 言

《辐射防护手册》是为适应我国核能事业及辐射和放射性同位素在工业、农业及医学等领域内应用的蓬勃发展，满足从事辐射防护工作的广大科技人员的实际需要，由核工业部安全防护卫生局和原子能出版社共同组织编写的。

《辐射防护手册》全书分《辐射源与屏蔽》、《辐射防护监测技术》、《辐射安全》《剂量估算》、《放射性三废处理与处置》及《辐射危害与医学监督》等六个分册。

在手册的编写过程中，我们力图较完整地反映辐射防护领域内各方面的内容，并避免不必要的重复。在取材上，除必要的理论阐述外，尽量选择实用价值较大的数据、图表、公式和方法等资料，以便于从事辐射防护工作的科技人员在实际工作中直接查阅和应用。对所引用的资料，尽可能做了必要的核对，并选取最新的资料。

辐射防护是一门综合性的边缘学科，它与许多学科存在交叉领域，在有些领域内其界限也很难严格区分，这就对取材造成了某些不确定性。辐射防护和核安全有许多交叉的地方，本书主要讨论了核安全的基本原则、规章制度、辐射危险源、屏蔽和临界安全等，对核安全分析未作专门论述。辐射防护包括对工作人员和公众的防护，但考虑到环境保护涉及面很宽，本书主要讨论了环境辐射标准、环境监测、剂量计算和三废治理等，对放射性物质在环境中运动规律等问题未作深入的讨论。辐射的广义含意包含微波等，但本书不涉及这些问题。

本分册第1章至第4章由吴德强编写，华旦、吴德强、邢馥吏共同修改定稿，华旦审校第5章至第10章由华明川、邢馥吏、孙喜云和华旦编写，李春槐审校。全书由华旦统稿，李德平、潘自强审阅。

在审稿过程中，卢杰永、金光宇、顾俊仁、吴毅、肖泽久、宋书绶等同志提出不少宝贵修改意见；陈宝林、林宝玉，尚一钧、张凭、陈根甫等同志做了某些计算和部分文字工作。对诸同志的大力帮助，谨此表示由衷的感谢。

由于与辐射防护相关的学科很多，组织起来比较困难，再者编写这种大型手册也缺乏经验，因此手册中难免有不妥之处，敬望读者指正。

李德平 潘自强

目 录

第 1 章 放射性核素辐射源	(1)
1.1 放射性核素衰变链	(1)
1.1.1 衰变链中各代放射性核素衰变和生长的规律	(1)
1.1.2 常见人工放射性核素衰变链	(2)
1.1.3 $4n, 4n+1, 4n+2, 4n+3$ 系放射性衰变链	(19)
1.1.4 放射性核素及子体相对活度数値表	(19)
1.2 放射性核素的基本辐射特性	(45)
1.2.1 常见放射性核素的辐射特性	(45)
1.2.2 放射性核素的辐射能量标准	(99)
1.2.3 按辐射能量和半衰期分组的常见放射性核素	(102)
1.2.4 β 射线谱及 β 射线的韧致辐射.....	(114)
1.2.4.1 β 射线谱	(114)
1.2.4.2 β 射线谱的平均能量.....	(118)
1.2.4.3 β 射线和内转换电子的韧致辐射.....	(125)
1.3 放射性核素中子源	(128)
1.3.1 自发裂变中子源	(128)
1.3.2 (α, n) 反应中子源	(130)
1.3.3 (γ, n) 反应中子源.....	(138)
1.4 放射性核素的辐射生热	(142)
参考文献.....	(143)
第 2 章 反应堆辐射源	(145)
2.1 核裂变释放的能量	(145)
2.2 核裂变直接产生的放射性和电离辐射	(146)
2.2.1 瞬发中子和缓发中子	(146)
2.2.2 瞬发 γ 射线.....	(152)
2.2.3 裂变产物及其辐射特性	(154)
2.2.3.1 裂变产物产额	(154)
2.2.3.2 混合裂变产物的辐射特性	(155)
2.2.3.3 混合裂变产物的衰变热.....	(185)
2.3 次级相互作用产生的放射性及电离辐射	(188)
2.3.1 俘获 γ 射线.....	(188)
2.3.2 快中子非弹性散射 γ 射线.....	(195)
2.3.3 光中子	(198)
2.3.4 感生放射性	(198)
2.4 反应堆铀和钚燃料中重核素的积累	(211)

2.5 反应堆产生的氙.....	(215)
参考文献.....	(216)
第3章 低能加速器辐射源.....	(218)
3.1 加速器类型简介	(218)
3.2 低能加速器产生的辐射及其特性.....	(219)
3.2.1 概述	(219)
3.2.2 瞬时辐射	(219)
3.2.2.1 带电粒子初级束	(219)
3.2.2.2 X射线.....	(219)
3.2.2.3 中子	(222)
3.2.3 感生放射性	(226)
参考文献.....	(228)
第4章 X 射线机辐射源	(229)
4.1 X射线的产生机制及低能 X射线的一般特性	(229)
4.2 X射线机的工作原理	(231)
4.3 X射线机辐射源的照射量率	(233)
4.4 X射线的线质	(239)
参考文献.....	(242)
第5章 γ 射线屏蔽计算	(243)
5.1 各种典型几何形状源的 γ 辐射通量密度和屏蔽计算公式——点核 积分法.....	(243)
5.1.1 计算符号及单位	(243)
5.1.2 点核积分法简介	(244)
5.1.2.1 采用泰勒式表示的积累因子	(245)
5.1.2.2 用积累因子 B 表示的辐射通量密度计算式	(245)
5.1.3 各种典型几何形状源的 γ 射线辐射通量密度和屏蔽计算公式.....	(246)
5.1.3.1 均匀线源.....	(246)
5.1.3.2 均匀圆盘源	(248)
5.1.3.3 均匀矩形面源	(249)
5.1.3.4 均匀圆柱面源	(250)
5.1.3.5 半无限体源	(258)
5.1.3.6 无限平板源	(260)
5.1.3.7 均匀圆柱体源	(261)
5.1.3.8 截锥体源.....	(275)
5.1.3.9 球体源.....	(276)
5.2 γ 射线的减弱参数	(277)
5.3 宽束 γ 射线积累因子.....	(287)
5.3.1 积累因子的概念	(287)

5.3.2	几种典型源和常用屏蔽材料的积累因子	(287)
5.3.3	单层屏蔽积累因子解析表达式	(297)
5.3.4	多层屏蔽积累因子计算方法	(305)
5.4	有效减弱系数法的应用	(305)
5.5	体源自吸收和源内多次散射的处理	(308)
5.5.1	体源自吸收因子	(308)
5.5.2	体源内多次碰撞影响的处理	(313)
5.6	γ 射线斜射效应	(315)
	参考文献	(318)
第6章	中子屏蔽计算	(319)
6.1	张弛长度法	(319)
6.2	快中子减弱计算——分出截面法	(332)
6.2.1	分出截面	(332)
6.2.2	分出截面法在快中子减弱计算中的应用	(337)
6.3	低能中子的积累因子	(341)
6.4	减弱因子曲线及其应用	(345)
	参考文献	(350)
第7章	辐射的反照率	(352)
7.1	基本概念和定义	(352)
7.2	γ 辐射反照率	(353)
7.2.1	半无限厚散射体对 γ 辐射的微分反照率	(354)
7.2.2	有限厚散射体 γ 辐射微分反照率	(359)
7.2.3	γ 辐射的积分反照率	(359)
7.3	中子反照率	(383)
7.3.1	快中子反照率	(383)
7.3.2	中能中子反照率	(397)
7.3.3	热中子反照率	(399)
7.3.4	中子俘获 γ 辐射的反照率	(401)
7.4	反照率法的应用	(402)
	参考文献	(403)
第8章	贯穿辐射屏蔽的特殊问题	(404)
8.1	辐射沿孔道和缝隙贯穿	(404)
8.1.1	圆柱形孔道	(404)
8.1.2	圆环孔道	(406)
8.1.3	矩形孔道	(407)
8.1.4	矩形缝隙	(408)
8.1.5	局部穿入屏蔽层的圆形孔道	(409)
8.1.6	充有填料的孔道和缝隙	(411)

8.1.7 弯曲孔道	(413)
8.2 屏蔽层内空腔的影响	(415)
8.2.1 单个空腔	(415)
8.2.2 无规则的小空腔	(415)
8.3 大气的反散射	(416)
8.3.1 γ 射线大气反散射的估算	(416)
8.3.2 中子大气反散射的估算	(416)
参考文献	(418)
第9章 α和β粒子的屏蔽	(419)
9.1 α 粒子及其屏蔽	(419)
9.2 β 粒子及其屏蔽	(419)
9.3 ^{90}Sr - ^{90}Y 源容器屏蔽计算	(423)
9.4 操作 ^{32}P 手套箱的屏蔽计算	(424)
参考文献	(424)
第10章 某些屏蔽计算实例	(425)
10.1 γ 放射性同位素源屏蔽	(425)
10.2 放射性同位素辐照装置屏蔽	(432)
10.2.1 主屏蔽墙	(432)
10.2.2 迷道设计	(432)
10.2.3 屋顶的厚度	(434)
10.2.4 源存放水池的深度	(436)
10.3 X射线管屏蔽	(436)
10.4 电子加速器屏蔽	(448)
10.5 同位素中子源屏蔽	(452)
10.6 低能核子加速器屏蔽	(455)
参考文献	(459)
附录 A 几种函数表达式及其图表	(460)
附录 B 中子和γ射线屏蔽材料的物理和机械性能	(471)
附录 C 放射性核素γ射线照射量率常数计算	(476)
附录 D γ射线通量密度与空气吸收剂量率之间的转换系数	(476)
附录 E 国外一些典型混凝土的组成	(477)
附录 F 法定单位和传统专用单位换算表	(479)
参考文献	(480)

第 1 章 放射性核素辐射源

1.1 放射性核素衰变链

1.1.1 衰变链中各代放射性核素衰变和生长的规律

对于一个包括 n 代放射性核素的无衰变分支的衰变链，令 N_i 为 t 时刻第 i 代放射性核素的原子个数， λ_i 为其衰变常数，则可以写出如下方程组：

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -\lambda_1 N_1 \\ \frac{dN_2}{dt} &= \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dN_n}{dt} &= \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

若初始条件为

$$\left. \begin{aligned} N_1(0) &= N_{1,0} \\ N_2(0) &= 0 \\ &\dots\dots\dots \\ N_n(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

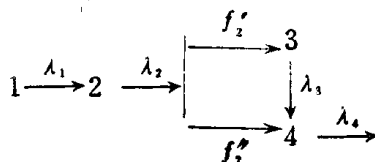
则由方程组(1.1)可得到 t 时刻各代放射性核素的原子个数

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= N_{1,0} e^{-\lambda_1 t} \\ N_2 &= N_{1,0} \lambda_1 \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_1 - \lambda_2} \right] \\ &\dots\dots\dots \\ N_n &= N_{1,0} \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdots \lambda_{n-1} \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \cdots (\lambda_n - \lambda_1)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \cdots (\lambda_n - \lambda_2)} + \cdots + \right. \\ &\quad \left. \frac{e^{-\lambda_n t}}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \cdots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

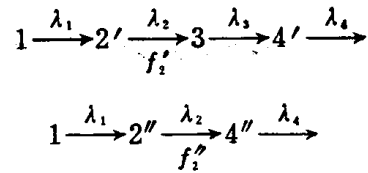
显然，第 i 代放射性核素的放射性活度为

$$A_i = \lambda_i N_i \quad (1.4)$$

对于有衰变分支的衰变链，计算 t 时刻各代放射性核素原子个数的方法可通过举例来说明。例如，存在如下所示的一个有分支的衰变链：



这里, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 分别为第 1, 2, 3, 4 代放射性核素的衰变常数; f_1' 和 f_1'' 分别为第 2 代核素衰变到第 3 和第 4 代核素的分支比。将这个衰变链分解为两个平行的无衰变分支的链:



对这两个链, 利用式(1.3)很容易分别写出 N_1, N_2', N_3, N_4' 和 N_1, N_2'', N_4'' 的表示式。但应注意: 从有衰变分支的第 2 代核素开始, N_2', N_3, N_4' 的表示式中要乘以分支比 f_1' ; N_2'' 和 N_4'' 的表示式中要乘以分支比 f_1'' 。于是,

$$N_1 \equiv N_1, \quad N_2 = N_2' + N_2''$$

$$N_3 \equiv N_3, \quad N_4 = N_4' + N_4''$$

衰变链中各代放射性核素的衰变和生长, 经常会出现以下三种典型情况:

(1) 过渡平衡:

当母体核素半衰期长于各子核时, $\lambda_2, \lambda_3, \dots > \lambda_1$, 在 $(\lambda_2 - \lambda_1)t, (\lambda_3 - \lambda_1)t, \dots$ 足够大时, 除式(1.3) $e^{-\lambda_1 t}$ 项外均可忽略。此时有

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2 = N_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

.....

$$N_n = N_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_n - \lambda_1} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \dots \frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_{n-1} - \lambda_1} \right)$$

即子核数与母核数趋于固定的比值。

(2) 长期平衡:

当母体核素半衰期远大于子核时, $\lambda_2, \lambda_3, \dots \gg \lambda_1$, 此时有

$$N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2 \dots = N_n \lambda_n$$

即各子核素之活度趋于母核素。

(3) 短半衰期母核:

当 $\lambda_1 > \lambda_2$, 在 $(\lambda_1 - \lambda_2)t$ 足够大时, 式(1.3) N_1 及 N_2 中的 $e^{-\lambda_1 t}$ 项已可忽略, 即

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t}$$

这就是说母核已几乎全部衰变为子核。由于这些子核半衰期较母核长, 在母核衰变期间子核有一定的积累, 所以 N_2 大于 $N_{10} e^{-\lambda_2 t}$ 。

1.1.2 常见人工放射性核素衰变链

本节列出了质量数小于 206 的常见人工放射性核素的衰变链。凡属裂变产物衰变链均标有“▲”号。

在所列表变链中, 衰变方式标在箭头的下部。其中, α 表示 α 衰变, β^+ 和 β^- 分别表示 β^+ 和 β^- 衰变, e 表示轨道电子俘获, IT 表示同质异能跃迁。 n^* 表示缓发中子发射。若核素具有

两种或两种以上的衰变方式，则在箭头的上部标出该种衰变方式的分支比(以百分数表示)。

