

# 辐射防护手册

## 第一分册

# 辐射源与屏蔽

主 编	李德平	潘自强
编 写 者	吴德强	邢馥吏
	华明川	华 旦
	孙喜云	
审 校 者	华 旦	李春槐
责任编辑	张文浩	

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 $\gamma$ 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

<b>第 1 章 放射性核素辐射源</b> .....	( 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值表 .....	( 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 $\beta$ 射线谱及 $\beta$ 射线的韧致辐射 .....	( 114 )
1.2.4.1 $\beta$ 射线谱 .....	( 114 )
1.2.4.2 $\beta$ 射线谱的平均能量 .....	( 118 )
1.2.4.3 $\beta$ 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 $(\alpha, n)$ 反应中子源 .....	( 130 )
1.3.3 $(\gamma, n)$ 反应中子源 .....	( 138 )
1.4 放射性核素的辐射生热 .....	( 142 )
参考文献 .....	( 143 )
<b>第 2 章 反应堆辐射源</b> .....	( 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 射线 .....	( 188 )
2.3.2 快中子非弹性散射 $\gamma$ 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)
<b>第3章 低能加速器辐射源.....</b>	<b>(218)</b>
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)
<b>第4章 X射线机辐射源.....</b>	<b>(229)</b>
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)
<b>第5章 <math>\gamma</math>射线屏蔽计算.....</b>	<b>(243)</b>
5.1 各种典型几何形状源的 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 射线的减弱参数.....	(277)
5.3 宽束 $\gamma$ 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	$\gamma$ 射线斜射效应 .....	( 315 )
	参考文献 .....	( 318 )
<b>第 6 章</b>	<b>中子屏蔽计算</b> .....	( 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 )
<b>第 7 章</b>	<b>辐射的反照率</b> .....	( 352 )
7.1	基本概念和定义 .....	( 352 )
7.2	$\gamma$ 辐射反照率 .....	( 353 )
7.2.1	半无限厚散射体对 $\gamma$ 辐射的微分反照率 .....	( 354 )
7.2.2	有限厚散射体 $\gamma$ 辐射微分反照率 .....	( 359 )
7.2.3	$\gamma$ 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 $\gamma$ 辐射的反照率 .....	( 401 )
7.4	反照率法的应用 .....	( 402 )
	参考文献 .....	( 403 )
<b>第 8 章</b>	<b>贯穿辐射屏蔽的特殊问题</b> .....	( 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 $\gamma$ 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 )
<b>第 9 章 <math>\alpha</math>和<math>\beta</math>粒子的屏蔽 .....</b>	<b>( 419 )</b>
9.1 $\alpha$ 粒子及其屏蔽 .....	( 419 )
9.2 $\beta$ 粒子及其屏蔽 .....	( 419 )
9.3 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 源容器屏蔽计算 .....	( 423 )
9.4 操作 $^{32}\text{P}$ 手套箱的屏蔽计算 .....	( 424 )
参考文献 .....	( 424 )
<b>第 10 章 某些屏蔽计算实例 .....</b>	<b>( 425 )</b>
10.1 $\gamma$ 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 )
<b>附录 A 几种函数表达式及其图表 .....</b>	<b>( 460 )</b>
<b>附录 B 中子和<math>\gamma</math>射线屏蔽材料的物理和机械性能 .....</b>	<b>( 471 )</b>
<b>附录 C 放射性核素<math>\gamma</math>射线照射量率常数计算 .....</b>	<b>( 476 )</b>
<b>附录 D <math>\gamma</math>射线通量密度与空气吸收剂量率之间的转换系数 .....</b>	<b>( 476 )</b>
<b>附录 E 国外一些典型混凝土的组成 .....</b>	<b>( 477 )</b>
<b>附录 F 法定单位和传统专用单位换算表 .....</b>	<b>( 479 )</b>
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， $\lambda_i$  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

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

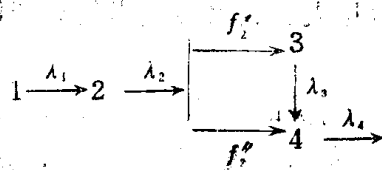
则由方程组(1.1)可得到  $t$  时刻各代放射性核素的原子个数

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

显然，第  $i$  代放射性核素的放射性活度为

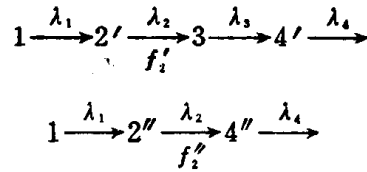
$$A_i = \lambda_i N_i \quad (1.4)$$

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;  $f_2'$  和  $f_2''$  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  $f_2'$ ;  $N_2'', N_4''$  的表示式中要乘以分支比  $f_2''$ 。于是,

$$\begin{aligned}
 N_1 &\equiv N_1, & N_2 &= N_2' + N_2'' \\
 N_3 &\equiv N_3, & N_4 &= N_4' + N_4''
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 N_1 &= N_{10} e^{-\lambda_1 t} \\
 N_2 &= N_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots \\
 N_n &= N_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_n - \lambda_1} \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \dots \dots \frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_{n-1} - \lambda_1} \right)
 \end{aligned}$$

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

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

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。

在所列衰变链中, 衰变方式标在箭头的下部。其中,  $\alpha$  表示  $\alpha$  衰变,  $\beta^+$  和  $\beta^-$  分别表示  $\beta^+$  和  $\beta^-$  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)。

