

γ 射线屏蔽参数手册

中国科学院工程力学研究所 编

原子能出版社

γ 射线屏蔽参数手册

中国科学院工程力学研究所编

原子能出版社

1976

内 容 简 介

本手册汇集了 γ 射线（包括X射线）屏蔽设计必需的主要参数，如辐射源、质量减弱系数和质能吸收系数、积累因子、反照率以及减弱倍数与屏蔽厚度的关系等等。可供从事放射性核素应用、辐射屏蔽、核医学的工作人员参考。

γ 射线屏蔽参数手册

中国科学院工程力学研究所编

原子能出版社出版

长春新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本 $850 \times 1168 \frac{1}{2}$ ·印张 $8 \frac{1}{16}$ ·字数225千字

1977年6月长春第一版·1977年6月长春第一次印刷

印数001—4000·定价：0.95元

统一书号：15175·042

前 言

寻求经济、有效的最佳屏蔽方案是发展原子能科学技术的重要课题之一。近年来，随着原子能事业的迅速发展，屏蔽技术的研究也颇有成效。屏蔽设计已由过去简单的经验处理和昂贵的模拟试验，发展到可以精确地进行理论计算。近十多年来，由于电子计算机技术的发展，产生了专供屏蔽设计计算用的新型计算机，可实现各种复杂的屏蔽问题的计算。因此，提供更为完善的屏蔽参数尤为必要。为适应我国原子能科学技术的发展，这里把国内外新近发表的 γ 射线屏蔽参数汇编成册，试为屏蔽设计工作提供一些参考数据。

我们在编写过程中，优先选用国内参数，力求切合我国实际。对于多年来一直沿用的积累因子数值，我们根据近年来发表的最新截面数据，作了大量的计算和实验，得到了较新的数值。

本手册采用了国际辐射单位与测量委员会1971年发表的报告（第19号报告）中所定义的辐射量与单位，在微剂量学和辐射防护方面引进了新加的量。量的更准确定义，在形式上虽有某些不同，但没有改变其意义或适用范围。为便于同过去的习用名称相比较，文中做了必要的说明。

原子能的应用越来越广，对屏蔽的要求也越来越高。从目前来看，屏蔽技术的研究同客观的要求还是不相适应的，有待于进一步加强。由于我们水平所限，本手册难免有不足之处，热切希望广大读者批评指正。

在手册的编写过程中，得到了有关兄弟单位的大力支持，在此一并表示感谢。

编 者

一九七五年

目 录

前言

第一章 辐射屏蔽有关的量和单位	1
1.1 辐射量	1
1.2 辐射防护中有关的量和单位	5
1.3 吸收剂量(吸收剂量率)与通量(通量密度)的关系	6
第二章 物理常数、单位及转换系数	10
2.1 物理常数和单位	10
2.2 转换系数	11
第三章 辐射源	15
3.1 放射性核素	15
3.2 反应堆活性区的 γ 射线	41
3.3 次级 γ 射线	42
第四章 γ 射线的作用截面	49
4.1 质量减弱系数	49
4.2 质能传递系数	50
4.3 质能吸收系数	51
第五章 γ 射线的散射	95
5.1 积累因子	95
5.2 γ 射线的反散射	114
第六章 γ 射线贯穿屏蔽体的减弱	120
6.1 γ 射线减弱倍数和屏蔽厚度的关系	120
6.2 镭、 ^{137}Cs 和 ^{60}Co γ 射线的减弱	121
6.3 减弱因子与屏蔽厚度的关系	121

第七章 X射线源及其屏蔽参数..... 228

7.1 X射线的辐照量 228

7.2 X射线的铅当量、半厚度值和什值厚度值 228

7.3 X射线的减弱曲线 237

参考文献..... 247

图表索引..... 254

附录 e^{-x} 函数表..... 257

第一章 辐射屏蔽有关的量和单位

关于辐射量的单位, 1928年国际放射学会议上提出以“伦琴”为单位, 当时是为X射线强度定义的, 在1937年的会议上推广应用用于 γ 射线。经过多年的研究与实践, 1953年国际辐射单位与测量委员会(ICRU)提出了“吸收剂量”定义, 规定其单位为拉德(rad)(等于100尔格/克), 适用于任何辐射。该委员会在1962年又提出了新的报告, 对辐射量和单位做了新的定义。后来, 在1968年发表了ICRU第11号报告, 1971年又发表了第19号报告, 并代替了前者。第19号报告中, 在微剂量学和辐射防护方面增添了新的量纲, 并提出了各种辐射量的严格定义。本手册采用了ICRU第19号报告的定义和量纲, 并对过去习用的辐射屏蔽参数的名称、定义和量纲做了相应的更改^[1-12]。

1.1 辐射量

电离辐射 是由直接或间接电离粒子或由两者混合组成的任何一种辐射。所谓直接电离粒子, 是带电粒子(电子、质子、 α 粒子等), 它具有足够的动能, 可以因碰撞产生电离。间接电离粒子, 则是不带电的粒子(中子、光子等), 但它们能释放直接电离粒子, 或能引起核转化。

放射性核素和放射性同位素 核素代表其核中具有一定数目质子和一定数目中子的一种原子。核素有稳定核素和放射性核素之分。放射性核素是能发生自然核转变(核素的一个变化或是一个同质异能跃迁)的核素。在原子物理学中, 常用核素做形容词, 例如: 单一核素的元素, 是指没有同位素的元素; 多核素的元素, 是指有多种同位素的元素。同位素是指原子序数相同而原子质量不同的核素, 它们在周期表上占有同一位置。放射性同位素只是放射性核素的一类, 因为放射性核素还包括那些没有同位素但具

有放射性的单一核素。

放射性 令 dN 表示时间间隔 dt 内发生自然核转变的数目，则一定量放射性核素的放射性 A 是 dN 除以 dt 所得的商：

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (1-1)$$

放射性的专用单位是居里 (Ci)，

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{核转变/秒 (精确值)}$$

半衰期 一定量的放射性核素有一半原子发生自然核转变所需要的时间。

通量和通量密度 粒子的通量是进入截面积为 da 的一个球体内的粒子数 dN 除以 da 所得的商：

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (1-2)$$

在时间间隔 dt 内，粒子通量的增量 $d\Phi$ 除以 dt 所得的商称之为通量密度或通量率，即

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-3)$$

能通量和能通量密度 粒子的能通量 ψ 是进入截面积为 da 的球体内所有粒子能量的总和 (不包括静止能量) dE_{r1} 除以 da 所得的商：

$$\psi = \frac{dE_{r1}}{da} \quad (1-4)$$

能通量密度或能通量率则是时间间隔 dt 内能通量的增量，即

$$\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt} \quad (1-5)$$

吸收剂量和吸收剂量率 吸收剂量是电离辐射给予一个体积单元中物质的平均能量 $d\bar{\epsilon}$ 除以该体积单元中物质的质量 dm ，

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1-6)$$

当质量趋近于零时，吸收剂量是平均比能的极限，即

$$D = \lim_{m \rightarrow 0} \bar{z} \quad (1-7)$$

吸收剂量的专用单位是拉德 rad。时间间隔 dt 内吸收剂量的增量称为吸收剂量率，即

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (1-8)$$

其专用单位是拉德除以时间单位，如拉德/秒，毫拉德/小时等。

辐照量和辐照率 在质量为 dm 的一个体积单元的空气中，由光子释放的所有电子(负电子和正电子)在空气中全部被阻时，产生的一种符号的离子的总电荷绝对值 dQ 除以 dm 所得的商称为辐照量，即

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (1-9)$$

辐照量的专用单位是伦琴 (R)：

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ 库仑/公斤 (精确值)}$$

约等于 87.0 尔格/克。

辐照率是时间间隔 dt 内辐照量的增量：

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad (1-10)$$

其专用单位是伦琴除以时间单位，如伦/秒，毫伦/小时等。

在所测体积中释放的次级电子产生的轫致辐射被吸收后再产生的电离；不能包括在 dQ 之内，但这只在高能时才有意义，除了这点差别，辐照量就是空气中比释动能的电离当量。

质量减弱系数 一定能量的间接电离粒子在密度为 ρ 的介质中，穿行 dl 距离时经受相互作用的粒子份额 dN/N 除以 ρdl 所得的商叫做质量减弱系数，即

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N} \frac{dN}{dl} \quad (1-11)$$

μ 称线性减弱系数，它具有长度的量纲，单位是厘米⁻¹。质量减弱系数的单位是厘米²/克。

质量减弱系数与相互作用截面 σ 的关系是：

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A \times \sigma}{M} \quad (1-12)$$

其中， N_A 是阿佛加德罗常数， M 是介质的克分子质量（对元素系克原子质量）。相互作用截面的单位是 [靶/原子] 或 [靶/分子]。

质能传递系数 一种物质对于某一能量 E 的间接电离粒子的质能传递系数，是入射粒子能量（不包括静止能量）在密度为 ρ 的介质中穿行 dl 距离时，由于相互作用转换成带电粒子初始动能的份额 dE_{tr}/E ，除以 ρdl 所得的商：

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho E} \frac{dE_{tr}}{dl} \quad (1-13)$$

对于给定的单能辐射，能通量和比释动能之间的关系是：

$$K = \psi \frac{\mu_{tr}}{\rho} \quad (1-14)$$

质能吸收系数 一种物质对于某一能量 E 的间接电离粒子的质能吸收系数，是该能量的质能传递系数减去次级带电粒子能量在物质中损失于韧致辐射的份额 g ，即

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - g) \quad (1-15)$$

当次级粒子动能可与其静止能量相比拟或比它大时， μ_{tr}/ρ 和 μ_{en}/ρ 可能相差很大，特别是对于高原子序数物质中的相互作用。

线能量传递或限制线性阻止本领 L_Δ 当带电粒子在一种介质中穿行距离 dl ，能量传递少于某给定值 Δ 时，由于碰撞损失的能量 dE 除以 dl 所得的商：

$$L_\Delta = \left(\frac{dE}{dl} \right)_\Delta \quad (1-16)$$

为简化标记并保证一致性，能量阈 Δ 以电子伏表示，这样 L_{100} 就是对于 100 电子伏能阈的线能量传递，而

$$L_{\infty} = S_{\text{碰撞}}$$

其中 $S_{\text{碰撞}}$ 是线性碰撞阻止本领。

1.2 辐射防护中有关的量和单位

剂量当量 是组织中，在所讨论的某一点的吸收剂量 D ，线质因子 Q 和任何其他修正因子的乘积 N 相乘所得的积：

$$H = DQN \quad (1-17)$$

式中 D 以拉德表示时， H 就用雷姆 (rem) 表示，雷姆是剂量当量的专用单位。

线质因子 (或称线质系数) Q 对线能量传递 L_{∞} 的依赖关系，国际辐射单位与测量委员会在第19号报告中给出了表1-1的关系。

表1-1 Q 与 L_{∞} 的关系^[1]

线能量传递 L_{∞} (在水中每微米损失的能量, 千电子伏)	线 质 因 子 Q
≤ 3.5	1
7	2
23	5
53	10
175	20

为便于应用，将不同射线的线质因子简化于表1-2。

表1-2 不同射线的线质因子 Q

照射类型	射 线 种 类	线质因子
外 照 射	X, γ , 电子	1
	热中子及能量小于0.005兆电子伏的中能中子	3
	中能中子 (0.02兆电子伏)	5
	中能中子 (0.1兆电子伏)	8
	快中子 (0.5—10兆电子伏)	10
	重反冲核	20
内 照 射	β^- , β^+ , γ , e^- , X	1
	α	10
	裂变过程中的碎片, α 发射过程中的反冲核	20

注: Q 值只限在容许剂量当量范围内使用, 不适用于大剂量及大剂量率的急性照射。

最大容许剂量当量 电离辐射能导致受照射者的躯体损伤和遗传损伤。根据以往的经验、实验资料和理论研究，国际放射防护委员会 (ICRP) 提出了最大容许剂量当量的规定，以限制受照量，使它所导致的危险对个人和广大居民都不至于不能接受。也就是说，这个剂量当量，从现在的知识看来，在人的一生中不会引起人体的显著损伤。除了控制年最大容许剂量当量外，还应控制职业性放射性工作人员的全身照射的终身累积剂量当量不得超过 250 雷姆。

1.3 吸收剂量 (吸收剂量率) 与通量 (通量密度) 的关系

最大容许剂量当量虽已给出，但在进行屏蔽设计时，一般是根据辐照量计算的。为此，需要找到两者的近似关系。图 1-1 给出了 γ 射线在生物组织中辐照量与吸收剂量的关系。对于单能的 γ 射线，在处于带电粒子平衡的条件下，粒子的通量密度 φ 或能通量密度 ψ 与吸收剂量率 P 的关系可由下式确定^[4]：

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{\varphi \times E \times \mu_{e.n} \times 1.6 \times 10^{-6}}{\rho \cdot 100} \\
 &= 1.6 \times 10^{-8} \psi \frac{\mu_{e.n}}{\rho} \text{ (拉德/秒)} \quad (1-18)
 \end{aligned}$$

式中， $\frac{\mu_{e.n}}{\rho}$ —— γ 射线在介质中的质能吸收系数；
 1.6×10^{-6} —— 由兆电子伏变成尔格；
 100 —— 1 拉德/克的尔格数。

(1-18) 式的计算结果列于表 1-3。

图 1-2 给出了空气中 γ 射线通量密度与吸收剂量率的换算关系。图 1-3 给出了 γ 射线通量与辐照率的关系曲线。

表1-3 γ 射线吸收剂量及吸收剂量率与能通量、能通量密度的关系^[4]

E, 兆电子伏	剂量为0.1拉德时相当于能通量		剂量率为2.5毫拉德/小时相当于	
	兆电子伏/厘米 ²	尔格/厘米 ²	能通量密度, 兆电子伏/厘米 ² ·秒	粒子通量密度, 粒子数/厘米 ² ·秒
0.01	1.38×10 ⁶	2.21	9.56	956
0.015	5.0×10 ⁶	8.0	34.7	2310
0.02	1.24×10 ⁷	12.4	86.4	4320
0.03	4.31×10 ⁷	43.1	299	9980
0.04	1.00×10 ⁸	160	698	17400
0.05	1.66×10 ⁸	266	1150	23100
0.06	2.18×10 ⁸	349	1510	25200
0.08	2.67×10 ⁸	427	1850	23200
0.10	2.68×10 ⁸	429	1860	18600
0.15	2.33×10 ⁸	373	1620	10800
0.3	2.17×10 ⁸	347	1510	5020
0.4	2.11×10 ⁸	338	1470	3660
0.5	2.10×10 ⁸	336	1460	2920
0.6	2.11×10 ⁸	338	1470	2440
0.8	2.16×10 ⁸	346	1500	1880
1.0	2.23×10 ⁸	345	1550	1550
1.25	2.33×10 ⁸	373	1620	1300
1.5	2.44×10 ⁸	390	1700	1130
2	2.62×10 ⁸	419	1820	912
3	2.96×10 ⁸	474	2060	686
4	3.22×10 ⁸	515	2240	559
5	3.45×10 ⁸	552	2400	480
6	3.36×10 ⁸	581	2520	420
8	3.91×10 ⁸	626	2710	339
10	4.08×10 ⁸	653	2840	284
15	4.4×10 ⁸	704	3060	204
20	4.56×10 ⁸	730	3170	158
30	4.60×10 ⁸	736	3190	106
40	4.60×10 ⁸	736	3190	29.8
50	4.56×10 ⁸	730	3170	63.4
60	4.5×10 ⁸	720	3120	52.0
80	4.37×10 ⁸	699	3040	37.9
100	4.28×10 ⁸	685	2970	29.7

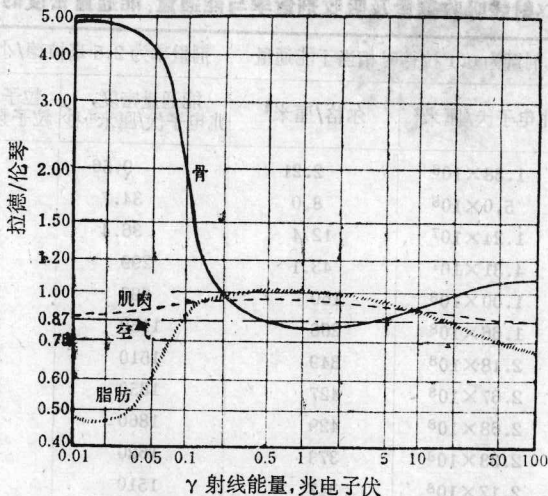


图1-1 γ 射线在生物组织中辐照量与吸收剂量的关系 [45]

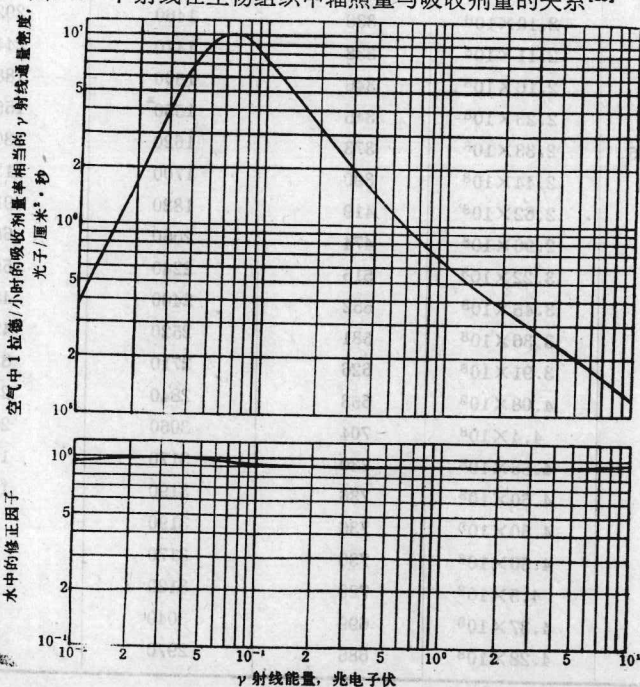


图1-2 空气中1拉德/小时的吸收剂量率与γ射线通量密度的换算关系 [11]

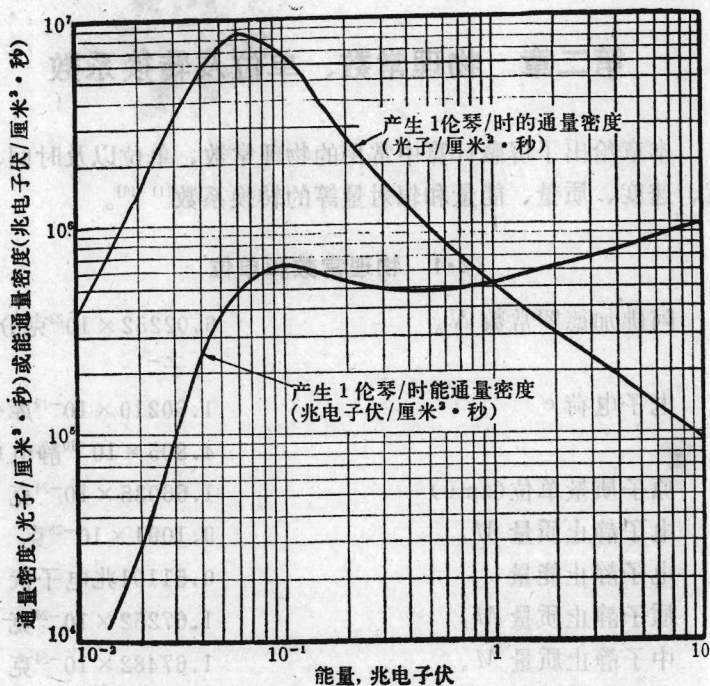


图1-3 空气中1伦琴/小时的辐照率与 γ 射线通量密度、能通量密度的换算关系^[14]

第二章 物理常数、单位及转换系数

本章给出了屏蔽计算中常用的物理常数、单位以及时间、长度、速度、质量、能量和辐射量等的转换系数^[11-16]。

2.1 物理常数和单位

阿佛加德罗常数 N_A	6.02252×10^{23} 克分子 ⁻¹
电子电荷 e	1.60210×10^{-19} 库仑
原子质量单位 (amu)	4.805×10^{-10} 静电单位
电子静止质量 M_e	1.66035×10^{-24} 克
电子静止能量	9.1091×10^{-28} 克
质子静止质量 M_p	0.51101 兆电子伏
中子静止质量 M_n	1.67252×10^{-24} 克
氢原子质量 M_H	1.67482×10^{-24} 克
α 粒子静止质量 M_α	1.67339×10^{-24} 克
电子的荷质比	6.6424×10^{-24} 克
普朗克常数 h	5.2730×10^{17} 静电单位/克
光速 c	6.6256×10^{-27} 尔格·秒
在标准状态下 1 克分子理想气体体积	2.997925×10^{10} 厘米/秒
每离子对的平均能量	
α 粒子 (在空气中)	22420.7 厘米 ³
电子 (在空气中)	34.98 ± 0.05 电子伏
α 粒子或电子 (在氩中)	33.73 ± 0.15 电子伏
居里 Ci	26.2 ± 0.2 电子伏
	3.7×10^{10} 核转变/秒

伦琴 (R)	2.58×10^{-4} 库仑/公斤 (精确值) 2.083×10^9 离子对/厘米 ³ (标准状态空气中) 87.0 尔格/克 (标准状态空气中) 5.43×10^7 兆电子伏/克 (标准状态空气中)
拉德 (rad)	100 尔格/克 10^{-2} 焦耳/公斤
电子伏特 (ev)	1.60256×10^{-12} 尔格
康普顿波长	2.426×10^{-10} 厘米
光子能量为 E 电子伏的 γ 射线波长	$\frac{1.239 \times 10^4}{E}$ 厘米
π	3.141593
$\log_{10}\pi$	0.497149
$1/\pi$	0.318309
π^2	9.869604
$\sqrt{\pi}$	1.772454
e	2.71828
$\log_{10}2$	0.301029
$\log_{10}e$	0.434295
$\ln 10$	2.302585
$\ln 2$	0.693147
$\ln \pi$	1.144729

2.2 转换系数

1. 时间

乘积 乘数	年	月	周	天	时	分	秒
年	1	12	52.17	365.24	8765.8	5.259×10^5	3.156×10^7
月	0.08333	1	4.286	30	720	4.320×10^4	2.592×10^6
周	0.01917	0.2333	1	7	168	1.008×10^4	6.048×10^5
天	2.738×10^{-3}	0.03333	0.1429	1	24	1440	86400
时	1.141×10^{-4}	1.389×10^{-3}	5.952×10^{-3}	0.04167	1	60	3600
分	1.902×10^{-7}	2.315×10^{-5}	9.921×10^{-5}	6.944×10^{-4}	0.01667	1	60
秒	3.169×10^{-8}	3.858×10^{-7}	1.653×10^{-6}	1.157×10^{-5}	2.778×10^{-4}	0.01667	1