

4

核工程丛书

核反应堆屏蔽

J. R. 哈里逊著 龔善康 臧德滋译

中国科学院图书馆

中国科学院图书馆
藏



—— ——— ———



核反应堆屏蔽

中国科学院图书馆 藏

核反应堆屏蔽

J. R. 哈里逊 著

龔善康 臧德滋 譯

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书系核工程丛书的第四册,主要介绍了反应堆屏蔽原理与实践上的基础知识。内容包括反应堆屏蔽、 γ 射线衰减、中子物理、屏蔽设计以及有关问题。

本书可供高等院校核工程、核物理专业师生及有关技术人员参考。

Nuclear Engineering Monographs
NUCLEAR REACTOR SHIELDING

J. R. Harrison

Temple Press Limited

核工程丛书(4)

核反应堆屏蔽

龔善康 臧德滋 譯

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)
上海市书刊出版业营业许可证出093号

上海市印刷三厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1168 1/32 印张 2 14/32 排版字数 69,000
1964年8月第1版 1964年8月第1次印刷
印数 1—2,500

统一书号 13119·566 定价(科六) 0.42元

序

随着核动力逐渐发展成为可以进行大量生产的和移动式的反应堆体系,反应堆屏蔽的重要性大大地增加了。现在,必须设计以经济为首要条件的有效的反应堆屏蔽,而对于移动式反应堆则需首先满足最小重量的要求。因此,在实验上和理论上都已经进行和正在进行这方面的许多研究工作,并且已经用科学方法代替一般的屏蔽“技术”。

本书的目的是提供反应堆屏蔽原理和实践的入门知识,并希望使那些刚进入反应堆领域和对这一课题作概括了解的人有所裨益。

作者感谢许多同事对本书提出了改进意见,特别是克拉克(W. G. Clarke)先生的建设性批评。同时也感谢允许发表他们著作中某些资料的许多作者。

J. R. 哈里逊

1958年10月

符 号

A = 原子量

A, α_1, α_2 = 泰勒积累系数

b = 散射角平均余弦

B = 每个核子的结合能

B = 积累因子

c = 光速

D = 扩散系数

E = 中子或 γ 射线的能量

Ei = 指数积分

h = 普朗克常数

J = 中子或 γ 射线流量

K_1 = 贝塞尔函数

I = 辐射强度

L = 热中子扩散长度

L_s = 快中子减速长度

m = 质量

N = 原子数/厘米³

N = 减速时被中子碰撞的平均数

n = 中子密度(中子数/厘米³)

P_0 = 反应堆运转功率

P_s = 反应堆停闭功率

r = 距离(球形或柱形)

r_0 = 经典电子轨道半径

R = 样品的放射性

R_0 = 初始放射性

S = 中子或 γ 射线的源强

seci = 正割积分

T = 温度

T = 衰变时间

T_0 = 辐照时间

t = 屏蔽厚度

$t_{1/2}$ = 半衰期

V = 体积

v = 中子速度

x = 距离(平板形)

Z = 原子序数

$$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$$

θ = 质心坐标系中的中子散射角

ξ = 平均对数能量减缩

ρ = 密度(克/厘米³)

σ = 微观截面

Σ = 宏观截面(= $N\sigma$)

ϕ = 通量

$\bar{\phi}$ = 平均通量

ψ = 实验室坐标系中的中子散射角

ν = 每次裂变的中子数

μ = 线性吸收系数

μ_0 = 能量线性吸收系数

λ = 平均自由程或张弛长度

λ = 衰变常数

目 录

序

符 号

第一章 核反应堆屏蔽·····	1
第二章 γ 射线的衰减·····	7
第三章 中子物理·····	28
第四章 屏蔽设计·····	42
第五章 其他问题·····	64
参考文献·····	68
索 引·····	70

第一章 核反应堆屏蔽

一个核反应堆在运转时，实际上在大量地发射出所有的基本粒子，由于这些粒子与物质的相互作用会产生一定的损害，必须把它们强度降低到一个安全的水平。辐射屏蔽就是为了这个目的而设置的，对于动力反应堆来说，它有好几呎厚。在本书中，提出了在辐射屏蔽中所遇到的一些问题的初浅讨论和它们的解决方法。显然，要提供大量有关这方面的详细资料是不可能的；假如需要的话，读者可以参考最近出版的普莱斯(Price)，霍尔登(Horton)和斯平尼(Spinney)⁽¹⁾的著作。在第一章中，我们将详述所涉及的问题和一些基本的考虑。

屏蔽设计的问题

在设计反应堆屏蔽时必须考虑的要点是：

1. 在屏蔽表面处可以允许的辐射水平。这将取决于反应堆的类型(即研究用的或者是动力用的)，因为仪器上测到的容许水平要比工作人员能接受的容许水平低；因此，假如辐射水平根据后者决定，就必须考虑工作人员在任何特殊的屏蔽面所逗留的时间。

2. 所需的屏蔽类型。反应堆屏蔽除了起着辐射屏蔽的功用以外，还可以作为系统结构的一个整体部分。此外，屏蔽设备可以根据最小的重量(例如，对于移动式反应堆)、最小的厚度(假如需要高中子束强度或者很容易把材料插入到活性区中去)或者最低的成本作出最佳的选择。考虑最低成本时必须包括反应堆结构和建筑物以及屏蔽材料和装置等所有的成本。

3. 然后决定所需的屏蔽厚度，并且计算在屏蔽中吸收辐射的

热量分布。假如产生的热量过多，就需要重新設計屏蔽层。

4. 必須考虑与屏蔽設計有关的一些特殊問題。例如，輻射沿冷却剂管道射出等等。

5. 輔助屏蔽設備，例如，从反应堆中取出的燃料元件以及循环燃料或冷却剂等所需的輔助屏蔽設備。

在这些問題中，有些因为理論方法和数据的不够完全，需要包括一个安全因素，并且計算出近似值。但是，过分安全的設計会增加不必要的屏蔽成本，所以應該注意使累积近似值不致于引起过大的誤差。

輻射与物质的相互作用

輻射与物质相互作用的形式取决于輻射的类型，輻射的能量和所通过的物质。在相互作用的过程中，产生了电离，它可以充分地弥散开来（例如，在 γ 射綫的相互作用中），或者集中在一处（例如，对于快速运动的重带电粒子）。在人体中引起的損害可以是暫时的，也可以是永久的。輻射防护委员会曾經提出某些在各种不同类型輻照下的最大允許水平(m. p. l.)的数据。在考虑这些建議之前，我們將討論一些定义和輻射强度的单位。

通量和截面

假如在某一物质中，每立方厘米有 n 个中子，每一个中子都以速度 v 厘米/秒运动着，則每立方厘米每秒被物质所吸收的中子数正比于物质中每立方厘米內的原子数，和1立方厘米內含有的中子在1秒內所經過的总距离，亦即，吸收数/厘米³·秒 $=Nnv\sigma_a$ ，其中， N 是原子数/厘米³， σ_a 称为吸收截面，它是 v 的函数，并且表征着物质的性质。 σ_a 的单位是平方厘米，通常用巴恩来量度。1巴恩 $=10^{-24}$ 厘米²。

每立方厘米中的原子数 $N=(0.6025 \times \rho \times 10^{24})/A$ ，其中， ρ 是密度， A 是物质的原子量， 0.6025×10^{24} 是阿伏伽德罗常数。

$\phi = nv$ 通常称为中子通量，它的单位是中子数/厘米²·秒； $\Sigma = N\sigma_a$ 是物质的宏观吸收截面，它的单位是厘米⁻¹。因此，吸收数/厘米²·秒可以写成等于 $\phi\Sigma_a$ 。

对于准直辐射，通量恰好是每秒通过垂直于射线束的单位面积的中子数。

流 量

在任一方向上的中子流 (J) 是每秒通过垂直于该方向的单位面积的中子数。它的单位是中子数/厘米²·秒，在准直辐射的特殊情况中，流量等于通量。流量是每秒通过平面上单位面积的净中子数的量度。在各向同性的通量中，任一方向的流量是 $\phi/4$ 。

这些通量、流量和截面的定义对于 γ 辐射是同样适用的。在某些例子中，确定能量流量是很方便的，它是以兆电子伏/厘米²·秒来量度的，例如，在 γ 辐射的情况，它等于 γ 射线流量乘以光子能量。

辐射强度的单位

伦琴, Röntgen, (r)

γ 辐射强度是通过测定每单位体积的总电离来量度的。它的单位是伦琴。伦琴的定义是 X 或 γ 辐射在标准温度和压力下 (20°C 和 76 厘米汞柱) 的 1 立方厘米空气中由于电离作用而产生正负两种符号的电荷各为 1 个静电单位所需的总量。由于 X 或 γ 辐射的生物效应正比于所产生的电离，因此这一单位可以用作为剂量的量度。可以证明，一个伦琴相当于在每克空气中放出 5.24×10^{13} 电子伏或者 83.8 尔格的能量。在细胞组织中，它更精确地相当于放出 93 尔格/克的能量。必须注意，伦琴是一个总的剂量，而不是剂量率。

在处理中子时，考虑到实际使用上的方便，对于能量大于 3 兆电子伏的 γ 射线，需要引出一个新的单位——拉德。

拉德(Rad)

拉德是吸收辐射的单位，它的定义是在有关地点被辐射所积累的能量的总数。被吸收的积分剂量，即在整个规定区域内吸收能量的积分值是用克-拉德来表示的。一个拉德相当于100 尔格/克的积累能量。在0~3兆电子伏的能量范围内可以把伦琴作为 γ 射线吸收辐射的单位；一个伦琴等于0.93 拉德。

相对生物效率, Relative Biological Efficiency, (r. b. e.)

由于电离辐射所造成的损害不仅取决于所吸收的能量的总额，而且还取决于所产生的微观电离密度。对于等量的吸收能量，由快质子产生的稠密的局部电离的危害性要比由 γ 辐射产生的弥散电离大得多。这个效应用一个称为相对生物效率的单位来计算，相对生物效率的定义为：

$$\frac{\text{由}\gamma\text{辐射产生一定效应的以拉德为单位的剂量}}{\text{由所考虑的辐射产生同一效应的以拉德为单位的剂量}}$$

由于 r. b. e. 取决于电离密度，因而对于重电离粒子和快中子来说，它的数值应该大些，因为由快中子所引起的损害取决于反冲粒子(特别是质子)。

表1扼要地列出了几种普通辐射的 r. b. e. 数值。

表1 相对生物效率

辐射	r. b. e.
γ 射线	1
质子(\rightarrow 10兆电子伏)	10
快中子(\rightarrow 10兆电子伏)	10
α 粒子(在内部)	10
重的反冲核	20

人体伦琴当量, Röntgen Equivalent Man, (rem)

这是一个常用的单位，它等于拉德和 r. b. e. 的乘积。要把不同类型辐射所引起的效应总加起来时就要用到它。

最大允許水平, Maximum Permissible Level; (m. p. l.)

对于全身剂量,特别是对于中子和 γ 輻射的全身剂量,輻射防护委员会建議:

1. 任何 30 岁以下的人所接受的总剂量不应超过 50 rem. 如果人口中有百分之二以上的人可以接受这个剂量,那么这一数字需要加以修正.

2. 任何人一生中所接受的总剂量不应超过 200 rem.

3. 在連續 13 星期的一个周期中,每星期的最大剂量是 0.3 rem.

这个报告对于人体特殊部位的照射提出了較为完整的資料. 对于每星期工作 40 小时的人,上述第 3 点相当于剂量率为 7.5×10^{-3} rem/小时或者 7.5 毫倫/小时.

屏蔽設計者往往用通量来进行設計. 表 2 和表 3 分別列出了 γ 射綫和中子的最大允許水平的照射通量.

表 2 40 小时中为 0.3 倫琴的 γ 射綫通量(7.5 毫倫/小时)

γ 能 量 (兆电子伏)	0.05	0.1	0.5	1	2	3	4	5
光子数/ 厘米 ² ·秒	6×10^4	4.6×10^4	7×10^3	3.8×10^3	2.2×10^3	1.7×10^3	1.4×10^3	1.2×10^3

表 3 40 小时中为 0.3 rem 的中子通量

中子能量	0.025 电子伏	1.0 电子伏	10 电子伏	0.1 兆 电子伏	0.5 兆 电子伏	1 兆 电子伏	2 兆 电子伏	3~10 兆 电子伏
中子数/ 厘米 ² ·秒	2000	2000	1000	200	80	60	40	30

居 里

放射性源的强度常常用居里来表示. 一居里規定为放射性源

的蜕变率为 3.7×10^{10} 次蜕变/秒。应该注意到这个单位是指放射性核的蜕变率，而并不一定是指 γ (或 β) 辐射的发射率。例如， Co^{60} 衰变时每次蜕变发射出两条 γ 射线，因此，一个居里 Co^{60} 发射出 7.4×10^{10} γ 射线/秒。

另一个偶尔用到的单位是卢瑟福，它所表示的蜕变率为 10^6 次蜕变/秒。

第二章 γ 射綫的衰減

X 和 γ 射綫的屏蔽問題是多年来进行大量研究的中心問題。它們与物质相互作用的本质已經得到了充分的了解，并且遵从理論計算。在这一章中，先表述反应堆屏蔽中所遇到的輻射源，再討論相互作用的机构，最后叙述窄輻射束和寬輻射束的衰減。

輻 射 源

在确定屏蔽中所泄出的 γ 輻射时，需要知道輻射源的强度及其能量，因为 γ 輻射在屏蔽中被吸收取决于它的能量（当然，也取决于屏蔽材料）。在反应堆中， γ 輻射的能量在 0.1~10 兆电子伏范圍內，它們来自：

- (i) 裂变过程。
- (ii) 裂变产物。
- (iii) 整个反应堆系統的放射性中子俘获，即 (n, γ) 反应。
- (iv) 放射性同位素的衰变。
- (v) 快中子的非彈性散射。
- (vi) 韧致輻射和正电子湮沒。

在这些項目中，作为 γ 輻射源來說，(v) 和 (vi) 較为次要，因此将不去詳細論述它。

裂变过程

在裂变瞬間所发射的 γ 射綫通常称为瞬发 γ 射綫。对于这种射綫的能量分布和总能量已經作过好多多次測量^(1,2)。对于 $E_\gamma > 0.2$ 兆电子伏的情况，各种数据能很好地符合，这里把它們扼要地列于图 1 和表 4 中。能量分布与裂变的核无关，并且与 $E_n < 1.0$ 兆电

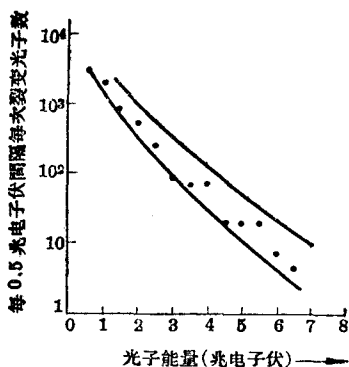


图1 每次 U^{235} 裂变的 γ 射线
(取自普莱斯⁽⁹⁾)

表4 瞬发裂变 γ 射线

γ 能量 (兆电子伏)	光子数/裂变
1	3.2
1.5	0.8
2.3	0.85
3	0.15
5	0.2

子伏的入射中子能量无关。已经测量到每次裂变所释放出的瞬发 γ 射线的总能量为 7.5 兆电子伏⁽¹⁾ 和 12 兆电子伏⁽²⁾，其差额是由低能 γ 射线所造成的。一般说来，这个差额对于屏蔽问题并不重要，因为低能光子已在活性区中被吸收，因而不进入屏蔽层中去。

裂变产物的 γ 射线

已经圆满地确定了三种可裂变同位素的裂变产物的分布，它们的衰变图也已完全了解。考虑每一个单独的产物，就能够测定各种不同的辐照时间和衰变以后的 β 和 γ 辐射的产额。对于 γ 辐射，这一点已在莫蒂夫 (Motoff)⁽³⁾ 所提出的报告中作了介绍，其中提供了在不同的辐照时间下，不同能量组的衰变图。图 2 转载了这些结果。这种表示方式对于某种屏蔽计算来说是很方便的，例如，决定受辐照的燃料元件所必需的屏蔽。这一结果并不包括停堆后两小时内的情况。

安特梅尔 (Untermeyer) 和威尔斯 (Weills)⁽⁴⁾ 提出了另一种估计类似的数据的方法，他们得出了 U^{235} 和天然铀经过不同的辐照时间以后所观测到的各种发热衰变。这表示在图 3 和图 4 中。

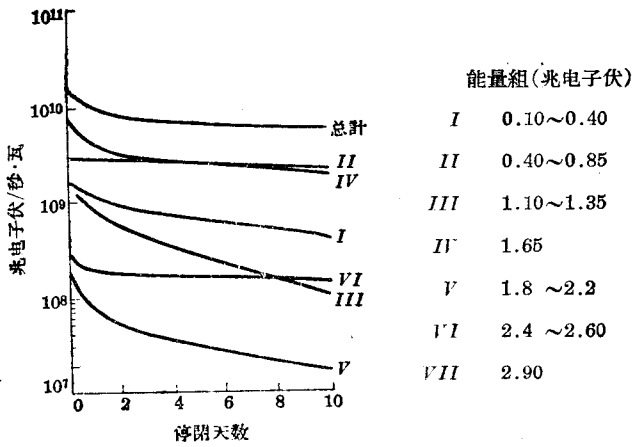


图2 运转1000小时的 γ 衰变率的能量组分布与停堆后的时间之间的关系
(取自莫蒂夫⁽³⁾)

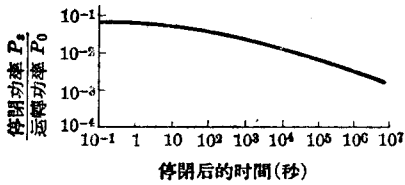


图3 运转无限长时间后 U^{235} 中的停闭功率
(取自安特梅尔和威尔斯⁽⁴⁾)

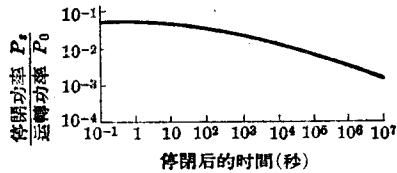


图4 运转无限长时间后天然铯中的停闭功率
(取自安特梅尔和威尔斯⁽⁴⁾)