

中华人民共和国国家职业卫生标准

GBZ/T 201.4—2015

放射治疗机房的辐射屏蔽规范

第 4 部分：镅-252 中子后装放射治疗机房

Radiation shielding requirements for radiotherapy room—
Part 4: Radiotherapy room of ²⁵²Cf neutron afterloading

2015-11-16 发布

2016-05-01 实施

中华人民共和国
国家卫生和计划生育委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 ^{252}Cf 中子治疗机房外关注点周围剂量当量率参考控制水平	2
5 ^{252}Cf 中子后装治疗机房的布局和屏蔽考虑	2
6 屏蔽计算方法	3
7 放射防护检测的要求与评价	6
附录 A (资料性附录) 不同场所的居留因子	8
附录 B (资料性附录) ^{252}Cf 中子后装治疗机房屏蔽估算示例	9
附录 C (资料性附录) ^{252}Cf 中子源的性能参数及辐射屏蔽估算使用的数据	14
参考文献	19

前 言

按照《中华人民共和国职业病防治法》制定本部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

GBZ/T 201《放射治疗机房的辐射屏蔽规范》分为以下五个部分：

- 第 1 部分：一般原则；
- 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房；
- 第 3 部分： γ 射线源放射治疗机房；
- 第 4 部分：钷-252 中子后装放射治疗机房；
- 第 5 部分：质子加速器放射治疗机房。

本部分是 GBZ/T 201 的第 4 部分。

本部分起草单位：中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所、河北省疾病预防控制中心、河南省职业病防治研究院。

本部分主要起草人：林志凯、邓君、侯长松、朱卫国、张震、张奇、葛丽娟、欧向明、周开建、张钦富。

放射治疗机房的辐射屏蔽规范

第4部分: 镭-252中子后装放射治疗机房

1 范围

GBZ 201 的本部分规定了镭-252(^{252}Cf)中子后装放射治疗机房辐射屏蔽的一般要求、屏蔽计算方法及放射防护检测的要求。

本部分适用于 ^{252}Cf 中子后装放射治疗机房。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GBZ/T 201.1—2007 放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第1部分:一般原则

GB/T 4835.1 辐射防护仪器 β 、 X 和 γ 辐射周围和/或定向剂量当量(率)仪和/或监测仪 第1部分:便携式工作场所和环境测量仪与监测仪

GB/T 14318 辐射防护仪器 中子周围剂量当量(率)仪

3 术语和定义

GBZ/T 201.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

控制区 controlled areas

辐射工作场所中要求或可能要求采取专门的防护手段和安全措施的区域。本部分指以 ^{252}Cf 中子后装放射治疗机房屏蔽墙和防护门等实体边界以内的区域。

3.2

监督区 supervised areas

辐射工作场所中通常不需要采取专门的防护手段和安全措施,但需要对其职业照射条件经常进行监督和检查的区域。本部分指以 ^{252}Cf 中子后装放射治疗机房屏蔽墙和防护门等实体边界邻近的区域,如控制室、候诊区域以及屏蔽体外人员经常驻留的区域。

3.3

关注点 attention point

屏蔽设计或检测辐射剂量水平时所感兴趣的空间位置。通常在距治疗机房墙和入口门外表面30 cm处和邻近治疗机房人员经常活动的驻留区域选择关注点。

3.4

参考控制水平 reference control level

为辐射防护目的而规定的剂量控制要求,作为辐射防护设计的基准值和放射工作场所辐射防护安全评价的依据。

3.5

俘获 γ 辐射 capture γ radiation

原子核俘获一个粒子,并发射瞬发 γ 射线的过程。

4 ^{252}Cf 中子治疗机房外关注点周围剂量当量率参考控制水平4.1 ^{252}Cf 中子治疗机房墙和入口门外的周围剂量当量率参考控制水平

^{252}Cf 中子治疗机房墙和入口门外的周围剂量当量率参考控制水平按式(1)计算:

- a) 中子治疗机房墙和入口门外的辐射剂量,是中子辐射剂量和中子与屏蔽物质相互作用而产生的俘获 γ 辐射剂量之和。关注点的周围剂量当量率按式(1)控制:

$$\dot{H}_e \leq \frac{H_c}{t \cdot U \cdot T} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

\dot{H}_e ——关注点的中子与 γ 辐射总周围剂量当量率参考控制水平,计算见式(2),单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$);

t ——中子治疗装置周累积照射时间,单位为小时每周(h/周);

U ——中子治疗装置的使用因子;

T ——人员在中子治疗机房外驻留的居留因子(见附录 A);

H_c ——关注点的周剂量参考控制水平,单位为微希沃特每周($\mu\text{Sv/周}$),规定其值如下:

中子治疗机房外监督区的工作人员: $\leq 100 \mu\text{Sv/周}$;

中子治疗机房外的公众人员: $\leq 5 \mu\text{Sv/周}$ 。

$$\dot{H}_e = \dot{H}_n + \dot{H}_\gamma \dots\dots\dots (2)$$

式中:

\dot{H}_e ——关注点的中子与 γ 辐射总周围剂量当量率参考控制水平,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$);

\dot{H}_n ——关注点的中子周围剂量当量率参考控制水平,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$);

\dot{H}_γ ——关注点的 γ 辐射周围剂量当量率参考控制水平,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$)。

- b) 按照关注点人员的不同居留因子,分别确定关注点的周围剂量当量率参考控制水平 \dot{H}_e ($\mu\text{Sv/h}$):

1) 人员居留因子 $T \geq 1/2$ 的场所: $\dot{H}_e \leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$;

2) 人员居留因子 $T < 1/2$ 的场所: $\dot{H}_e \leq 10 \mu\text{Sv/h}$ 。

4.2 ^{252}Cf 中子治疗机房顶层的周围剂量当量率要求

距中子治疗机房顶层外表面 30 cm 处的周围剂量当量率应符合 4.1 的要求。在设计和评价治疗机房顶层屏蔽时,不考虑天空反、散射对治疗机房临近区域的周围剂量当量率的影响。

5 ^{252}Cf 中子后装治疗机房的布局和屏蔽考虑5.1 ^{252}Cf 中子后装治疗机房的布局要求

5.1.1 治疗机房一般设于单独的建筑或建筑物底层的一端。位置应充分考虑周围场所人员的驻留情况,尽量减少不必要的人员照射。

5.1.2 治疗机房使用面积应不小于 35 m^2 ($7 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 不包括迷路面积), 层高不低于 3.0 m 。为安全考虑, 治疗机房应采用迷路形式通向机房外, 并在入口处设置防护门。防护门采用含硼聚乙烯等防中子材料和防俘获 γ 辐射材料复合制成。

5.1.3 迷路可分为 Z 型迷路和 L 型迷路, 迷路屏蔽墙应与室顶连接。迷路墙厚度根据实际情况设计, 通常迷路口宽为 2 m , 迷路通道宽为 2 m 。带 Z 型迷路的机房布局见图 B.1, 带 L 型迷路的机房布局见图 B.2。

5.1.4 应在醒目位置设置电离辐射警告标志、声光报警和工作状态指示灯, 应设置门机联锁装置, 应在迷路内设置应急停机按钮开关。

5.2 ^{252}Cf 中子后装治疗机房屏蔽考虑

5.2.1 治疗机房需屏蔽的辐射源项包括中子和俘获 γ 射线。

5.2.2 屏蔽计算应按照 ^{252}Cf 中子后装治疗机的额定载源量计算, 并考虑 2 倍的安全系数。

5.2.3 ^{252}Cf 中子后装治疗机房的屏蔽计算, 应按 4π 立体角发射的各向同性点源计算, 并以中子源位于施源器的中子源位置作为屏蔽计算时辐射源的参考位置。

6 屏蔽计算方法

6.1 屏蔽计算步骤

6.1.1 根据 ^{252}Cf 中子后装治疗机中子源载源量计算距源 1 m 处的中子注量率 $\dot{\varphi}_n$ 和 γ 射线注量率 $\dot{\varphi}_\gamma$ 。

6.1.2 应用 ^{252}Cf 中子源的中子注量 φ_n 与中子周围剂量当量 $H^*(10)$ 的转换系数 $H^*(10)/\varphi$ 计算距源 1 m 处的中子周围剂量当量率 \dot{H}_n 。

6.1.3 根据屏蔽关注点距源的距离 R 计算屏蔽关注点处无屏蔽时的中子周围剂量当量率。

6.1.4 根据屏蔽关注点处周围剂量当量率参考控制水平, 计算应达到设计要求的屏蔽透射因子 B 。

6.1.5 计算屏蔽关注点所需中子屏蔽材料半值层 TVL 的数目 n 。

6.1.6 屏蔽材料半值层 TVL 值与所需半值层的数目 n 的乘积即计算得到所需的屏蔽厚度 T_s 。

6.1.7 考虑到 2 倍的安全系数, 计算得到的屏蔽厚度 T_s 需增加 1 个半值层 HVL 值。

6.2 屏蔽厚度的计算方法

6.2.1 距源 100 cm 处的中子注量率 $\dot{\varphi}_n$ 按式(3)计算:

$$\dot{\varphi}_n = \frac{S}{4 \times \pi \times d^2} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$\dot{\varphi}_n$ ——中子注量率, 单位为每秒平方厘米 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);

S ——中子各向同性点源的源强(即中子发射率)单位为每秒 (s^{-1});

d ——距源的距离, 100 cm 。

距单位质量中子源 1 m 处的中子注量率为 $1.91 \times 10^4 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{mg}^{-1}$, γ 射线注量率为 $1.05 \times 10^5 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{mg}^{-1}$ (见 B.3)。

6.2.2 距源 1 m 处的中子周围剂量当量率 \dot{H}_n 按式(4)计算:

$$\dot{H}_n = \frac{S}{4 \times \pi \times d^2} \times H^*(10)/\varphi \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

$H^*(10)/\varphi$ —— ^{252}Cf 中子源中子注量与周围剂量当量的转换系数, $385 \text{ pSv} \cdot \text{cm}^2$;

S ——中子各向同性点源的源强(即中子发射率)单位为每秒(s^{-1});

d ——为屏蔽关注点与源的距离,单位为米(m)。

距源 1 m 处的中子周围剂量当量率为 $26.47 \text{ mSv}/(\text{h} \cdot \text{mg})$, γ 射线周围剂量当量率为 $1.66 \text{ mSv}/(\text{h} \cdot \text{mg})$, γ 射线与中子周围剂量当量率之比为 0.06(见 B.3)。

6.2.3 距源 d 处无屏蔽时中子周围剂量当量率按式(5)计算:

$$\dot{H}_{\text{Rn}} = \frac{M \cdot \dot{H}_n}{d^2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:

\dot{H}_{Rn} ——距源 d 处无屏蔽时中子周围剂量当量率,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv}/\text{h}$);

\dot{H}_n ——距 1 mg ^{252}Cf 源 1 m 处的中子周围剂量当量率,单位为毫希沃特每小时毫克 [$\text{mSv}/(\text{h} \cdot \text{mg})$];

M —— ^{252}Cf 的质量,单位为毫克(mg);

d ——为屏蔽关注点与源的距离,单位为米(m)。

6.2.4 关注点屏蔽透射因子 B 按照式(6)计算:

$$B = \frac{\dot{H}_0}{\dot{H}_{\text{Rn}}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

B ——透射因子;

\dot{H}_0 ——关注点周围剂量当量率参考控制水平,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv}/\text{h}$);

\dot{H}_{Rn} ——距源 d m 处无屏蔽时中子周围剂量当量率,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv}/\text{h}$)。

6.2.5 关注点所需屏蔽材料什值层的数目 n 按式(7)计算:

$$n = \lg\left(\frac{1}{B}\right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中:

B ——透射因子。

6.2.6 屏蔽材料什值层 TVL 值与该材料什值层的数目 n 的乘积即计算得到所需屏蔽的厚度 T_s , 见式(8):

$$T_s = n \cdot \text{TVL} \quad \dots\dots\dots(8)$$

6.2.7 考虑 2 倍的安全系数,则应增加 1 个半值层值 HVL,计算如式(9)示:

$$T_{\text{S+HVL}} = T_s + \text{HVL} \quad \dots\dots\dots(9)$$

HVL 与 TVL 的关系为: $1 \text{ HVL} = 0.301 \text{ TVL}$ 。

^{252}Cf 中子源的性能参数列于表 C.1 中。

6.2.8 防护门屏蔽厚度的计算:防护门处的周围剂量当量率主要由穿过迷宫屏蔽墙的透射辐射和迷宫口内侧屏蔽墙的反散射辐射引起。同时应考虑俘获 γ 辐射对防护门处周围剂量当量率的贡献。计算公式见式(10):

- a) 中子透射剂量当量率按式(10)计算:

$$\dot{H}_{nT} = \dot{H}_d \cdot e^{-\mu_n t} \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中:

\dot{H}_{nT} ——中子穿过迷路内墙的透射周围剂量当量率,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$);

\dot{H}_d ——无屏蔽时防护门处的中子周围剂量当量率,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$);

μ_n ——屏蔽材料对中子的剂量减弱因子,单位为每厘米(cm^{-1});

t ——屏蔽材料的厚度,单位为厘米(cm)。

- b) γ 辐射透射剂量当量率按式(11)计算:

$$\dot{H}_{\gamma T} = \dot{H}_{d\gamma} \cdot e^{-\mu t} \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中:

$\dot{H}_{\gamma T}$ —— γ 辐射穿过迷路内墙的透射周围剂量当量率,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$);

$\dot{H}_{d\gamma}$ ——无屏蔽时防护门处的 γ 辐射周围剂量当量率,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$);

μ ——屏蔽材料对 γ 辐射的线性减弱系数,单位为每厘米(cm^{-1});

t ——屏蔽材料的厚度,单位为厘米(cm)。

- c) 防护门处由一次反散射辐射引起的中子周围剂量当量率按式(12)计算:

$$\dot{H}_S = \frac{\dot{H}_n \cdot \alpha_1 \cdot A_1}{(d_1 \cdot d_2)^2} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中:

\dot{H}_S ——中子的反散射周围剂量当量率,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$);

\dot{H}_n ——距源 1 m 处的中子周围剂量当量率,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$);

α_1 ——混凝土对中子的反散射系数;

A_1 ——迷路口屏蔽墙的散射面积,单位为平方米(m^2);

d_1 ——屏蔽墙散射面与源的距离,单位为米(m);

d_2 ——防护门距屏蔽墙散射面的距离,单位为米(m)。

若存在二次反散射,则式(12)中应考虑二次反散系数、二次反散射面积和二次反散射距离的影响。

- d) 计算防护门处中子透射和中子反散射剂量当量率之和,再按照式(6)、式(7)、式(8)计算防护门所需中子屏蔽材料的厚度;
- e) 用于²⁵²Cf 中子后装治疗机房屏蔽材料的特性:用于²⁵²Cf 中子后装治疗机房四周及顶棚主要使用普通混凝土,防护门外层可为不锈钢等装饰材料,内层使用 5% 含硼聚乙烯板或含硼石蜡,必要时,防护门应使用一定厚度的铅,用于屏蔽²⁵²Cf 中子源中子在混凝土中产生的俘获 γ 辐射。常用屏蔽²⁵²Cf 中子源的屏蔽材料特性列于表 C.2 中;
- f) 为便于估算常用中子屏蔽材料对²⁵²Cf 中子源的中子辐射和 γ 辐射的屏蔽厚度,给出混凝土和聚乙烯对中子平均能量的剂量当量什值层 TVL 值(cm)的曲线(图 C.1)。同时给出 1 $\mu\text{g}^{252}\text{Cf}$ 中子源位于聚乙烯(密度 0.96 g/cm^3)、石蜡(密度 0.92 g/cm^3)、水及混凝土(密度 2.35 g/cm^3) 球中心时表面的中子剂量当量率与半径厚度的关系曲线(图 C.2)、1 $\mu\text{g}^{252}\text{Cf}$ 中子源快中子、热中子、初始 γ 辐射和俘获 γ 辐射剂量率与混凝土厚度的关系曲线(图 C.3)。

7 放射防护检测的要求与评价

7.1 检测仪器的基本要求

7.1.1 对中子源检测仪器的要求

检测时中子源的照射状况和使用仪器要求如下：

- a) 屏蔽防护检测时， ^{252}Cf 中子源处于裸源照射状态，同时，应记录检测时 ^{252}Cf 中子源的源强；
- b) 检测 ^{252}Cf 中子后装治疗机房周围及工作场所的辐射防护剂量检测仪器应使用两类仪器： γ 辐射剂量(率)仪和中子周围剂量当量(率)仪。仪器的指示值应使用周围剂量当量(率)的单位表示，如 $\mu\text{Sv}(\mu\text{Sv/h})$ 、 $\text{mSv}(\text{mSv/h})$ 等。

7.1.2 γ 辐射剂量(率)仪的辐射特性基本要求

γ 辐射剂量(率)仪应符合 GB/T 4835.1 的要求。

7.1.3 中子周围剂量当量(率)仪的辐射特性基本要求

中子周围剂量当量(率)仪应符合 GB/T 14318 的要求。

7.2 检测位置的确定

7.2.1 治疗机房屏蔽墙外侧的放射防护检测位置为：沿仪器探测器灵敏体积等中心距屏蔽墙外侧表面 30 cm、距地面一定高度周围一切人员可以到达的位置进行巡测，并记录测量结果。

7.2.2 治疗机房顶层外侧的放射防护检测位置为：在对应治疗机房顶部区域，沿前后、左右和对角线方向距顶层表面 30 cm 高度巡测，重点检测位置是中子源垂直照射的区域，并记录测量结果。

7.2.3 防护门外侧屏蔽防护检测位置：距防护门外侧表面 30 cm 处，门体为推拉门或单扇平开门时，沿门体左缝、右缝、上缝、下缝和门体中间部位及锁眼位置巡测，记录各测量点的最大辐射剂量值。门体为双扇对开平开门时，要测量门体中间缝隙的辐射剂量值。

7.2.4 控制室屏蔽防护测量位置：在控制室内距机房屏蔽墙 30 cm、距地面一定高度处进行巡测，同时需测量人员操作位置的辐射剂量，并记录测量结果。

7.3 检测结果处理

7.3.1 检测报告基本内容

检测报告应包括下述内容：

- a) 检测报告中应分别给出中子周围剂量当量(率)仪和 γ 辐射剂量(率)仪测量的本底周围剂量当量率值；
- b) 应分别给出每一测量点经过测量仪器校准因子修正后的中子和 γ 射线周围剂量当量率值及两者之和；
- c) 测量净值大于仪器本底测量值标准偏差的 3 倍时，检测结果应扣除检测场所仪器的本底测量值；
- d) 测量值小于仪器本底标准偏差的 3 倍时，检测结果应按小于最低可探测限(MDL)表示。

7.3.2 检测结果评价

检测结果评价要求如下：

- a) 应按照 4.1 中剂量当量率参考控制水平的要求评价；
- b) 根据²⁵²Cf 后装治疗机的实际使用因子 U 、人员居留因子 T 和周累积照射时间 $t(\text{h})$ 计算屏蔽关注点的周围剂量当量率, 将实际测量结果与该计算值相比较；
- c) 比较结果大于 4.1 中式(1)的计算结果, 则确定辐射剂量水平超过周剂量参考控制水平。对于剂量当量率超过参考控制水平的检测点, 应给出超出参考控制水平的范围, 分析可能的原因, 提出改进屏蔽的建议；
- d) 比较结果小于 4.1 中式(1)的计算结果, 则确定辐射剂量水平符合周剂量参考控制水平。同时应符合 b) 中的参考控制水平要求, 则可做出符合屏蔽设计要求的结论；
- e) 人员居留因子 $T \geq 1/2$ 的场所, 周围剂量当量率 $\leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$ 时, 则确定符合屏蔽设计要求；
- f) 人员居留因子 $T \leq 1/2$ 的场所, 周围剂量当量率 $\leq 10 \mu\text{Sv/h}$ 时, 则确定符合屏蔽设计要求。

附 录 A
(资料性附录)
不同场所的居留因子

不同场所的居留因子见表 A.1。

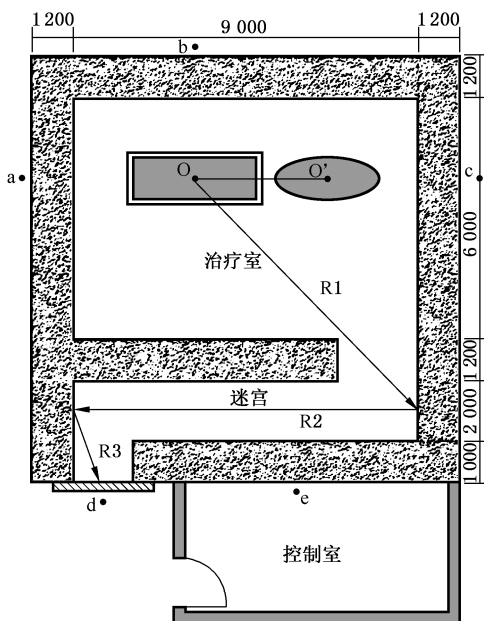
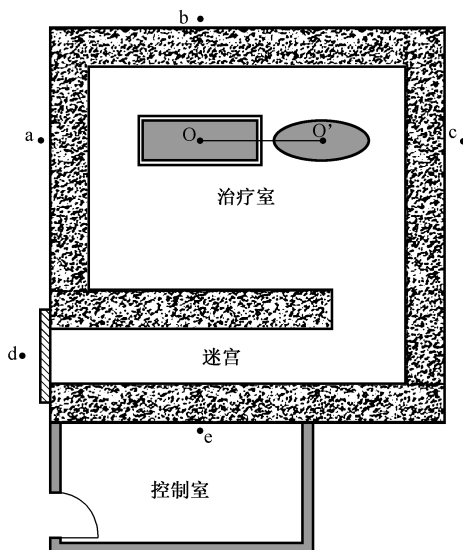
表 A.1 不同场所的居留因子

场所	居留因子(T)		示例
	典型值	范围	
全居留	1	1	管理人员或职员办公室、治疗计划室、治疗控制室、护士站、咨询台、有人护理的候诊室以及周边建筑物中的驻留区
部分居留	1/4	1/2~1/5	1/2: 相邻的治疗室、与屏蔽室相邻的病人检查室 1/5: 走廊、雇员休息室、职员休息室
偶然居留	1/16	1/8~1/40	1/8: 各治疗室房门 1/20: 公厕、自动售货区、储藏室、设有座椅的户外区域、无人护理的候诊室、病人滞留区域、屋顶、门岗室 1/40: 仅有来往行人车辆的户外区域、无人看管的停车场、车辆启动卸货/卸客区域、楼梯、无人看管的电梯

注：引自 GBZ/T 201.1—2007 附录 A 表 A.1。

附录 B

(资料性附录)

 ^{252}Cf 中子后装治疗机房屏蔽估算示例B.1 ^{252}Cf 中子后装治疗机房屏蔽估算示例条件B.1.1 带 Z 型迷路的 ^{252}Cf 中子后装治疗机房(如图 B.1 所示)。图 B.1 带 Z 型迷路的 ^{252}Cf 中子后装治疗机房布局示意图B.1.2 带 L 型迷路的 ^{252}Cf 中子后装治疗机房布局(如图 B.2 所示)。图 B.2 带 L 型迷路的 ^{252}Cf 中子后装治疗机房布局示意图

B.2 应用图 B.1 和图 B.2 估算治疗机房屏蔽厚度的方法

已知某一²⁵²Cf 中子后装治疗机,额定载源量为 1 mg。机房布局如图 B.1 所示。

a、b、c 屏蔽关注点按照 0.5 μSv/h 参考控制水平计算,d、e 屏蔽关注点按照 2.5 μSv/h 参考控制水平计算。估算各屏蔽关注点所需的混凝土屏蔽厚度。若考虑 2 倍的安全系数,则再附加 1 个半值层 HVL 厚度。各屏蔽关注点与源的距离分别为:a 距源 5.2 m;b 距源 5.2 m;c 距源 6.8 m;d 距源 6.8 m;e 距源 7.2 m。

已知距²⁵²Cf 源 1 m 处的中子周围剂量当量率为 $\dot{H}_{n1} = 26.47$ mSv/h,则应根据式(5)先计算出各屏蔽关注点未加屏蔽时的周围剂量当量率 \dot{H}_{n0} ,再由图 C.2 中查出对应 1 mg²⁵²Cf 源各屏蔽关注点的屏蔽厚度 T_0 ,然后查出参考控制剂量当量率对应的屏蔽厚度 T_1 ,则将未加屏蔽时的周围剂量当量率 \dot{H}_{n0} 减弱到参考控制时所需的屏蔽厚度为: $T_1 - T_0$ 。各屏蔽关注点所需屏蔽厚度计算结果列于表 B.1 中。

表 B.1 各屏蔽参考点屏蔽厚度估算结果

关注点	与源距离 m	H_{n0} mSv/h	T_0 cm	参考控制剂量当量率 μSv/h	T_1 cm	混凝土厚度 $T_1 - T_0$ cm	减弱倍数法计算结果 cm ^a
a	5.2	0.979	62	0.5	135	73	92
b	5.2	0.979	62	0.5	135	73	92
c	6.8	0.572	66	0.5	135	69	86
d	6.8	0.572	66	2.5	125	59	66(迷路屏蔽)
e	7.2	0.511	65	2.5	125	60	64

^a 由图 C.1 查的混凝土对²⁵²Cf 源中子的 TVL = 28 cm;根据式(6)、式(7)、式(8)计算得到。

同理可以估算带 L 型迷路的²⁵²Cf 中子后装治疗机房所需的屏蔽厚度,L 型迷路布局示意图见图 B.2。

B.3 距 1 mg²⁵²Cf 中子源 1 m 处中子及 γ 辐射周围剂量当量率的计算

B.3.1 距²⁵²Cf 中子源 1 m 处中子周围剂量当量率的计算

按照式(3)计算距源 1 m 处的中子注量率 $\dot{\varphi}_n$ 如下:

$$\dot{\varphi}_n = \frac{2.4 \times 10^9}{4 \times 3.14 \times 100^2} = 1.91 \times 10^4 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$$

按照式(4)计算距源 1 m 处的中子周围剂量当量率如下:

$$\dot{H}_n^* = 385 \times 12^{-12} \times 1.91 \times 10^4 \times 10^3 \times 3.6 \times 10^3 = 26.47 \text{ mSv/h}$$

B.3.2 距 1 mg²⁵²Cf 中子源 1 m 处 γ 辐射周围剂量当量率的计算

同理,可用式(3)计算距源 1 m 处的 γ 辐射注量率 $\dot{\varphi}_\gamma$ 如下:

$$\dot{\varphi}_\gamma = \frac{1.32 \times 10^{10}}{4 \times 3.14 \times 100^2} = 1.05 \times 10^5 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$$

按照式(4)计算距源 1 m 处的 γ 辐射周围剂量当量率如下:

$$\dot{H}_\gamma^*(10) = 4.38 \times 10^{-12} \times 1.05 \times 10^5 \times 10^3 \times 3.6 \times 10^3 = 1.66 \text{ mSv/h}$$

B.3.3 γ /中子周围剂量当量率比的计算

$$\dot{H}_\gamma^*(10) / \dot{H}_n^*(10) = 1.66 \div 26.47 \approx 0.06$$

B.4 机房屏蔽验证计算示例

B.4.1 机房周围屏蔽墙及迷路和顶层的屏蔽厚度计算:

已知中子后装机²⁵²Cf 额定载源量为 1 mg, 机房布局如图 B.1 所示。机房治疗室面积为 $9 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 54 \text{ m}^2$, 包括迷宫在内的总面积为 $9 \text{ m} \times 9.2 \text{ m} = 82.8 \text{ m}^2$ 。屏蔽采用普通混凝土, 计算该机房所屏蔽关注点 a、b、c、d、e 处所需屏蔽厚度, 各关注点距屏蔽物表面 30 cm。

B.4.2 对于关注点 a、b、c, 按照公众偶然居留计算, 取居留因子为 1/4, 对于关注点 d、e, 按工作人员全居留计算, 取居留因子为 1, 周工作时间按 40 h 计算, 则使用因子取为 1。按照式(1)计算, 则关注点 a、b、c 的参考控制剂量率水平为 $2.5 \mu\text{Sv/h}$, 关注点 d、e 的参考控制剂量率水平为 $0.5 \mu\text{Sv/h}$, 机房顶层屏蔽分别按工作人员和公众参考控制剂量率水平计算。关注点 a、b、c、d、e 与治疗时源的距离与表 B.1 中相同。根据式(5)、式(6)、式(7)、式(8)计算的各屏蔽关注点的屏蔽厚度列于表 B.2 中。

表 B.2 各屏蔽参考点屏蔽厚度估算结果

关注点	与源距离 m	H_{n0} mSv/h	控制水平 $\mu\text{Sv/h}$	屏蔽透射因子 B	什值层数目 n	混凝土厚度 ^e cm	考虑 2 倍安全 系数
a	5.2	0.979	0.5(公众 $T=1/4$)	5.1×10^{-4}	3.29	109	119
b	5.2	0.979	0.5(公众 $T=1/4$)	5.1×10^{-4}	3.29	109	119
c	6.8	0.572	0.5(公众 $T=1/4$)	8.7×10^{-4}	3.06	101	111
d	6.8	0.572	2.5(职业 $T=1$)	6.3×10^{-3}	2.36	78(迷路屏蔽)	88
e	7.2	0.511	2.5(职业 $T=1$)	4.4×10^{-3}	2.31	76	86
顶层 ^a	3.8	1.85	2.5(职业 $T=1$)	1.4×10^{-3}	2.85	94	104
顶层 ^b	3.8	1.85	10(职业 $T=1/4$)	5.4×10^{-3}	2.27	75	85
顶层 ^c	3.8	1.85	40(职业 $T=1/16$)	2.2×10^{-2}	1.66	55	65
顶层 ^d	3.8	1.85	0.5(公众 $T=1/4$)	2.7×10^{-4}	3.57	118	128

^a 取职业人员 $T=1$ 。

^b 取职业人员 $T=1/4$ 。

^c 取职业人员 $T=1/16$ 。

^d 取公众 $T=1/4$ 。

^e 混凝土 TVL 取为 33 cm(取自 NCRP Report No.151 报告 P148), 混凝土 1 HVL=10 cm。

若考虑 2 倍的安全系数, 则所计算屏蔽厚度应再加上 1 HVL 厚度 10 cm 即可。

B.4.3 防护门屏蔽厚度的计算:

防护门处的中子辐射剂量主要由透射过迷路屏蔽墙的中子辐射和迷宫口反散射辐射引起, 因此, 防护门处的中子辐射剂量为两者周围剂量当量率之和。此外, 还应考虑俘获 γ 的屏蔽。

计算步骤如下：

- a) 防护门处中子的透射辐射周围剂量当量率计算：

根据式(10)计算(按表 C.1 数据计算,迷路屏蔽厚度为 88 cm)：

$$\dot{H}_{nT} = 572 \cdot e^{-0.083 \times 88} = 0.38 \mu\text{Sv/h}$$

- b) 防护门处²⁵²Cf 中子源 γ 透射辐射周围剂量当量率计算：

根据式(11)计算防护门处 γ 透射辐射周围剂量当量率：

$$\dot{H}_{\gamma T} = \frac{1 \ 660}{6.8^2} \cdot e^{-0.167 \times 88} = 0 \mu\text{Sv/h}$$

混凝土对 0.8 MeV 的 γ 辐射线性减弱系数为 0.167 cm^{-1} (表 C.4)。

计算结果表明,在²⁵²Cf 中子后装治疗机房屏蔽计算时,可不考虑其固有 γ 辐射的贡献。

- c) 带 Z 型迷宫的机房防护门处中子的反散射辐射周围剂量当量率计算：

根据机房布局图 B.1 可知,中子辐射经迷宫口墙壁经一次反散射到达防护门左侧屏蔽墙,再经二次反散射到达防护门外侧。计算得到:中子从照射位入射到迷宫口屏蔽墙的距离 $R_1 = 6.5 \text{ m}$,一次反散射到防护门左侧屏蔽墙的距离 $R_2 = 9 \text{ m}$,二次散射到达防护门外侧距离 $R_3 = 1.8 \text{ m}$,散射面积 $S = \text{迷路宽度} \times \text{散射面高度}$ 。

已知距源 1 m 处的中子周围剂量当量率为 26.47 mSv/h ,对于 45° 角入射和散射的中子,散射系数为 $\alpha_n = 0.058$,散射面积 $S_1 = 2 \text{ m} \times 3.5 \text{ m} = 7 \text{ m}^2$, $S_2 = 2 \text{ m} \times 3.5 \text{ m} = 7 \text{ m}^2$ 。

实际上,防护门处的中子辐射剂量来自一次散射和二次散射的影响。一次散射面到达防护门相对迷路中点的距离为 8 m,该点到达防护门外侧表面的距离为 2 m。根据式(11)计算防护门处一次散射和二次散射中子周围剂量当量率如下：

$$\dot{H}_{S1} = \frac{26.47 \times 0.058 \times 7}{(6.5 \times 8 \times 2)^2} = 1.0 \mu\text{Sv/h}$$

$$\dot{H}_{S2} = \frac{26.47 \times 0.058 \times 7 \times 0.058 \times 7}{(6.5 \times 9 \times 1.8)^2} = 0.40 \mu\text{Sv/h}$$

防护门外侧的总中子辐射剂量为： $0.38 \mu\text{Sv/h} + 1.0 \mu\text{Sv/h} + 0.40 \mu\text{Sv/h} = 1.78 \mu\text{Sv/h}$ 。

结果表明,迷宫屏蔽墙为 88 cm 时,防护门外侧的透射中子辐射与反散射中子周围剂量当量率之和为 $1.78 \mu\text{Sv/h}$ 。

- d) 防护门 d 处俘获 γ 剂量当量率估算：

已知 $1 \text{ mg}^{252}\text{Cf}$ 中子源强度为 2.4×10^9 中子数/s,关注点 d 与源距离为 6.8 m,由表 C.1 取迷路屏蔽墙厚 88 cm,则计算 d 处中子注量率为：

$$\varphi_{nd} = \frac{2.4 \times 10^9}{4 \times 3.14 \times 680^2} = 4.13 \times 10^2 \text{ 中子数}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$$

由图 C.3 查出对应 88 cm 处的俘获 γ 剂量率为： $1.4 \times 10^{-3} \mu\text{Svh}^{-1}/(\text{中子数 s}^{-1})\text{cm}^2$ 。

计算关注点 d 处的俘获 γ 剂量率为：

$$1.4 \times 10^{-3} \mu\text{Svh}^{-1}/(\text{中子} \cdot \text{s}^{-1})\text{cm}^2 \times 4.13 \times 10^2 \text{ 中子数}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2) = 0.58 \mu\text{Sv/h}$$

结论:关注点 d 处的总辐射周围剂量当量率为：

$$1.78 \mu\text{Sv/h} + 0.58 \mu\text{Sv/h} = 2.36 \mu\text{Sv/h}$$

设计结果要求 $< 2.5 \mu\text{Sv/h}$,符合设计要求。

现拟将防护门 d 处的周围剂量当量率控制在 $1.0 \mu\text{Sv/h}$,则将中子辐射水平控制在 $0.5 \mu\text{Sv/h}$,将 γ 辐射水平控制在 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 内,分别计算如下：

防护门屏蔽中子材料拟用含硼聚乙烯或聚乙烯,已知中子剂量率为 $1.78 \mu\text{Sv/h}$,散射中子能量按式(C.2)计算：

中子散射能量： $E_s = 0.24 \times 2.35 = 0.564 \text{ MeV}$

聚乙烯对散射中子的什值层 TVL_s 按式(C.3)计算:

$$TVL_s = 6.2 + 3.4 \times 0.564 \approx 8.1 \text{ cm}$$

根据式(6)、式(7)、式(8)计算得到含硼聚乙烯或聚乙烯厚度为 4.5 cm。

不考虑含硼聚乙烯或聚乙烯对俘获 γ 辐射的防护效果,根据表 C.4 数据,采用线性内插法计算铅对 2.23 MeV 俘获 γ 辐射的线性衰减系数为 0.506 cm^{-1} 。根据计算要求,将式(11)变换如下:

$$t = \frac{1}{\mu} \ln \frac{\dot{H}_{\text{dr}}}{\dot{H}_{\text{YT}}}$$

将 $\mu = 0.506 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\dot{H}_{\text{dr}} = 0.58 \mu\text{Sv/h}$ 、 $\dot{H}_{\text{YT}} = 0.5 \mu\text{Sv/h}$ 代入上式,求出所需铅的厚度如下:

$$t = \frac{1}{0.506} \ln \frac{0.58}{0.50} = 0.30 \text{ cm}$$

防护门屏蔽材料可设为:内层为 4.5 cm 厚含硼聚乙烯,外层为 0.3 cm 厚铅板,防护门外层用 1 mm~2 mm 厚不锈钢包封。

结论:防护门使用 4.5 cm 厚含硼聚乙烯,3 mm 厚铅和 0.2 mm~0.4 mm 厚不锈钢时,屏蔽关注点 d 处的周围剂量当量率为: $\leq 1.0 \mu\text{Sv/h}$ 。

按照上述计算方法,可以验证治疗机房周围及顶层屏蔽关注点的俘获 γ 剂量当量率。

同理,可以计算任何布局机房的屏蔽。

附录 C

(资料性附录)

²⁵²Cf 中子源的性能参数及辐射屏蔽估算使用的数据

C.1 ²⁵²Cf 中子源的性能参数

见表 C.1。

表 C.1 ²⁵²Cf 中子源的性能参数

参数类别	半衰期 年	中子平均能量 MeV	比中子源强 s ⁻¹ mg ⁻¹	γ 平均能量 MeV	γ 比活度 s ⁻¹ mg ⁻¹	γ/n 周围剂量当量率 比值
参数	2.65 ^a	2.35 ^b	2.4×10 ^{9a}	0.75 ^c	1.32×10 ^{10c}	0.06 ^c
^a 取自 ISO 14152。 ^b 取自《核科学技术辞典》等。 ^c 根据参考文献理论计算得到(ISO 14152 给出 0.05;《中子源物理》给出 1.3×10 ¹⁰ 、0.07)。						

²⁵²Cf 中子源中子注量与周围剂量当量的转换系数为： $H^*(10)/\varphi = 385 \text{ pSv} \cdot \text{cm}^2$ ；

²⁵²Cf 中子源的 γ 辐射能量近似按 0.8 MeV 计算，γ 注量与周围剂量当量的转换系数为： $H_\gamma^*(10)/\varphi = 4.38 \text{ pSv} \cdot \text{cm}^2$ 。

C.2 用于²⁵²Cf 中子后装治疗机房屏蔽材料的特性

见表 C.2。

表 C.2 用于²⁵²Cf 中子后装治疗机房屏蔽材料的特性

材料	密度 g/cm ³	含氢量原子 cm ³	中子减弱因子 ^b μ _n cm ⁻¹	γ 射线减弱系数 ^b cm ² /g	分子式
水	1.0	6.7×10 ²²	0.110	0.032 1	H ₂ O
普通混凝土	2.35	1.38×10 ^{22 a}	0.083	0.070 9	—
纯聚乙烯	0.95	8.18×10 ²²	0.134	0.080 9	(CH ₂) _n
PE+B ₁ C(重量比 8%) ^c	0.97	7.68×10 ²²	0.126	0.080 9	(CH ₂) _n + B ₁ C
PE+H ₃ BO ₃ (5%硼含量)	1.09	6.14×10 ²²	0.101	0.080 9	(CH ₂) _n + H ₃ BO ₃
石蜡	0.90	7.59×10 ²²	0.125	—	—
含硼石蜡(重量比 8% 硼含量硼砂) ^d	1.01	6.98×10 ²²	0.115	—	石蜡 + Na ₂ B ₄ O ₇
含硼石蜡(重量比 8% 硼含量硼砂) ^e	0.97	7.04×10 ²²	0.116	—	石蜡 + Na ₂ B ₄ O ₇ · 5H ₂ O
铅	11.34	—	—	0.088 5	—

表 C.2 (续)

材料	密度 g/cm ³	含氢量原子 cm ³	中子减弱因子 ^b μ _n cm ⁻¹	γ射线减弱系数 ^b cm ² /g	分子式
不锈钢	7.8	—	—	0.066 9	—
铁	7.8	—	—	0.066 9	—

^a 取自 ISO 14152。

^b 对 0.8 MeV 的 γ 射线,取自《辐射防护手册 第一分册:辐射源与屏蔽》。

^c 取自 ICRP 第 21 号报告,8%重量比的 B₁C 聚乙烯相当于含纯硼约 6.4%。

^d 8%重量比的无水硼砂+石蜡相当于含纯硼 1.71%。

^e 8%重量比的五水硼砂+石蜡相当于含纯硼 1.19%。

C.3 普通混凝土对²⁵²Cf 中子源快中子的反散射系数 α_n的估算

混凝土对快中子的反散射系数 α_n可按半经验式(C.1)估算:

$$\alpha_n(E_0, \theta_0, \theta) = \frac{F(E_0) \cos \theta_0 \cos \theta}{\cos \theta_0 + \cos \theta} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

$$F(E_0) = E_0 \cdot \exp(0.9719 - 2.895 \sqrt{E_0} + 0.3417 E_0);$$

α_n(E₀, θ₀, θ)——中子的反散射系数,单位为每平方米(m⁻²);

E₀——中子能量, E₀ = 2.35 MeV;

θ₀——中子的入射角,单位是度(°);

θ——反散射角,单位是度(°)。

表 C.3 中列出混凝土对 0°、30°、45°入射中子的反散射系数[F(E₀) = 0.165]。

表 C.3 混凝土对 0°、30°、45°、60°入射中子的反散射系数 α_n[散射面积(m²)]

不同入射角 θ ₀	不同反散射角 θ 时的反散射因子 α _n				
	0°	30°	45°	60°	75°
0°	8.3 × 10 ⁻²	7.7 × 10 ⁻²	6.8 × 10 ⁻²	5.5 × 10 ⁻²	3.4 × 10 ⁻²
30°	7.7 × 10 ⁻²	7.1 × 10 ⁻²	6.4 × 10 ⁻²	5.2 × 10 ⁻²	3.3 × 10 ⁻²
45°	6.8 × 10 ⁻²	6.4 × 10 ⁻²	5.8 × 10 ⁻²	4.0 × 10 ⁻²	3.1 × 10 ⁻²
60°	5.5 × 10 ⁻²	5.1 × 10 ⁻²	4.8 × 10 ⁻²	4.1 × 10 ⁻²	2.8 × 10 ⁻²

注: 根据式(C.1)计算,式(C.1)取自《辐射防护手册 第一部分:辐射源与屏蔽》式(7.24)、式(7.25)。

C.4 普通混凝土对²⁵²Cf 中子源快中子散射能量的估算

⁵²Cf 中子源快中子经混凝土散射后的能量可由式(C.2)估算:

$$E_{sc} = 0.24 \bar{E}_0 \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

E_{sc}——散射中子的能量,单位兆电子伏(MeV);

\bar{E}_0 —— ^{252}Cf 中子源中子的平均能量,单位兆电子伏(MeV)。

^{252}Cf 中子源快中子经混凝土一次散射后的中子能量为: $E_{sc}=0.24 \times 2.35=0.564 \text{ MeV}$ 。

注:式(C.2)取自 NCRP Report No.79。

C.5 防护材料对不同能量 γ 辐射的减弱因子

为便于估算所用防护材料对 γ 辐射的减弱,将铅、铁和聚乙烯对 γ 辐射的减弱系数列于表 C.4 中。

表 C.4 常用屏蔽材料对不同能量 γ 辐射的减弱系数

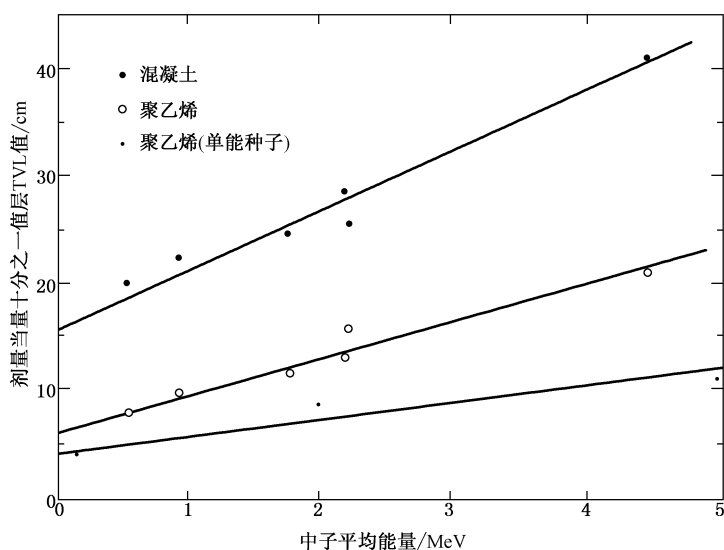
光子能量 MeV	铅(Pb) $\rho=11.34\text{g/cm}^3$		铁(Fe) $\rho=7.8\text{g/cm}^3$		混凝土 $\rho=2.35\text{g/cm}^3$	
	μ/ρ	μ	μ/ρ	μ	μ/ρ	μ
0.30	0.404	4.581	0.110	0.858	0.108	0.254
0.40	0.231	2.620	0.094 0	0.733	0.096 3	0.226
0.50	0.161	1.826	0.084 0	0.655	0.087 7	0.206
0.60	0.125	1.418	0.076 9	0.560	0.081 0	0.190
0.80	0.088 5	1.004	0.066 9	0.522	0.070 9	0.167
1.00	0.070 8	0.803	0.059 9	0.467	0.063 7	0.150
1.50	0.051 7	0.586	0.048 8	0.381	0.051 9	0.122
2.0	0.045 5	0.516	0.042 5	0.332	0.044 8	0.105
3.0	0.041 8	0.474	0.036 2	0.282	0.036 5	0.086

注:表 C.4 数据取自《辐射防护手册 第一分册:辐射源与屏蔽》; μ/ρ 是质量减弱系数, cm^2/g ; μ 是线性减弱系数, cm^{-1} ; ρ 是屏蔽材料密度, g/cm^3 。

C.6 估算 ^{252}Cf 中子后装治疗机房屏蔽用的相关曲线

利用某些中子屏蔽材料屏蔽中子的什值层与中子能量的关系、中子剂量当量率与屏蔽厚度的关系曲线可以方便的估算所选材料的屏蔽厚度。相关曲线图如下所示:

a) 混凝土和聚乙烯屏蔽中子的什值层与中子平均能量的关系见图 C.1;



注:取自 NCRP No.79,1987。

图 C.1 球壳屏蔽的中子剂量当量什值层与中子平均能量的关系

根据中子平均能量,即可查出对应屏蔽材料的什值层 TVL 的数值,由此可计算所用屏蔽材料的厚度。半值层 HVL 与什值层 TVL 的关系为:1 HVL=0.301 TVL。

聚乙烯屏蔽中子的什值层 TVL 值与中子能量有关,可用式(C.3)表示:

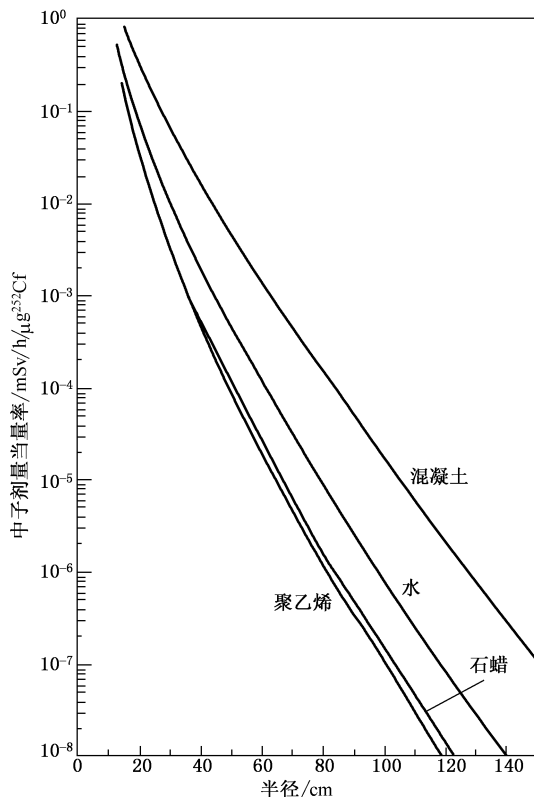
$$TVL_{PE} = 6.2 + 3.4 \bar{E}_0 \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

\bar{E}_0 ——中子的平均能量,单位为兆电子伏(MeV)。

注:式(C.3)取自 NCRP Report No.79 报告。

b) 1 μg 的²⁵²Cf 在聚乙烯、水、混凝土球中心时,其表面的中子剂量当量率见图 C.2:

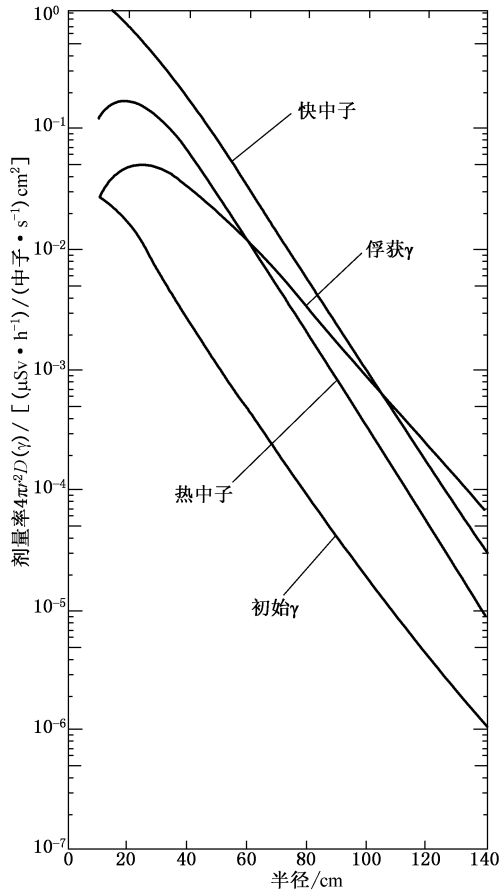


注:引自国际放射防护委员会第 21 号出版物:外部源致电离辐射的防护数据图 24。

图 C.2 1 μg 的²⁵²Cf 在聚乙烯、水、混凝土球中心时表面中子剂量当量率与半径厚度的关系

c) 屏蔽计算中对 γ 俘获辐射剂量率的计算:

- 混凝土中的氢(吸收截面 0.33b)吸收中子产生 2.23 MeV 的俘获 γ 射线,与²⁵²Cf 中子源的初始 γ 辐射相比更难以屏蔽。在²⁵²Cf 中子后装治疗机房的屏蔽计算时,不能忽略俘获 γ 射线对屏蔽的影响。
- 根据²⁵²Cf 中子源的快中子、热中子、初始 γ 辐射和俘获 γ 辐射剂量率与混凝土厚度的关系可有效估算屏蔽关注点处的俘获 γ 辐射剂量率。其关系见图 C.3。



注：引自 DP-1246 Health and Safety(TID-4500,UC-41)： ^{252}Cf Shielding Guide。

图 C.3 ^{252}Cf 中子源快中子、热中子、初始 γ 辐射和俘获 γ 辐射剂量率与混凝土厚度的关系

参 考 文 献

- [1] International Standards Organization. ISO 14152-2001. Neutron radiation protection shielding-Design principles and considerations for the choice of appropriate materials, First edition, Printed in Switzerland, 2001
- [2] 国际放射防护委员会第 21 号出版物.外部源致电离辐射的防护数据-ICRP 第 15 号出版物的补充报告.陈常茂,译.北京:原子能出版社,1981
- [3] NCRP Report No.79. Neutron Contamination from Medical Electron Accelerators. Issued Novembder 1, 1984
- [4] D.H.Stoddard, H.E.Hootman. DP-1246 Health and Safety(TID-4500, UC-41). ^{252}Cf Shielding Guide. Savannah River Laboratory, Contract At(07.2)-1 with the United Stats Atomic Energy Commission, 1971
- [5] IAEA Reports Series No.47. Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities. Vienna, 2006
- [6] NCRP Report No.151. Structural Shuelding Design and Evaluation for Megavoltage X and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities
- [6] 李德平,潘自强.辐射防护手册.第一分册:辐射源与屏蔽.北京:原子能出版社,1987
- [7] 丁厚本,王乃彦.中子源物理.北京:科学出版社,1984
-