

辐射防护及保健物理

司书屹 2022011090

2025 年 5 月 9 日

第九次作业

1. 计算 4 MeV α 粒子在石墨中的剂量率

思路：采用解析法计算剂量率，需注量率和石墨中 α 粒子的质量碰撞阻止本领。注量率由题目直接给出，阻止本领通过 [NIST ASTAR 数据库](#) 查询。

公式：

$$\dot{D} = 3.6 \times 10^6 \cdot \dot{\phi} \cdot \left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{col}}$$

参数：注量率 $\dot{\phi} = 10 \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，4 MeV α 粒子在石墨中的电子阻止本领 $\left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{col}} = 1.456 \times 10^{-9} \text{ J m}^2/\text{kg}$ 。代入：

$$\dot{D} = 3.6 \times 10^6 \cdot 10 \cdot 1.456 \times 10^{-9} = 0.05242 \text{ mGy/h}$$

答案： 0.05242 mGy/h.

2. 计算 ^{60}Co 溶液管道的照射量率和空气比释动能率

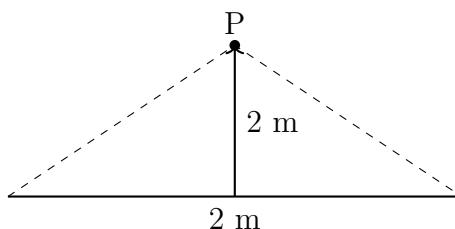


图 1：线源几何示意图

思路：管道视为线源，计算照射量率和比释动能率需单位长度活度、几何参数和常数。活度由浓度和截面积计算，几何参数由题目给出，常数来自课件和 [Ninkovic et al. \(2005\)](#)。

照射量率公式：

$$\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot C_l \cdot (\tan^{-1}(l_1/h) + \tan^{-1}(l_2/h))}{h}$$

单位长度活度：

$$C_l = 2.1 \times 10^9 \text{ Bq/cm} \cdot 1 \text{ cm}^2 = 2.1 \times 10^{11} \text{ Bq/m}$$

几何参数： $l_1 = l_2 = 1 \text{ m}$, $h = 2 \text{ m}$, 角度和 $2 \cdot \tan^{-1}(1/2) \approx 0.9272 \text{ rad}$ 。常数： $\Gamma = 2.56 \times 10^{-18} \text{ C m}^2 \text{ kg}^{-1}$ 。代入：

$$\dot{X} = \frac{2.56 \times 10^{-18} \cdot 2.1 \times 10^{11} \cdot 0.9272}{2} \approx 8.971 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

转换为 R/h ($1 \text{ R} \approx 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$)：

$$\dot{X} \approx \frac{8.971 \times 10^{-4}}{2.58 \times 10^{-4}} \approx 3.48 \text{ R/h}$$

比释动能率公式：

$$\dot{K} = \frac{\Gamma_k \cdot C_l \cdot (\tan^{-1}(l_1/h) + \tan^{-1}(l_2/h))}{h}$$

常数： $\Gamma_k = 3.09 \times 10^{-13} \text{ Gy m}^2 \text{ Bq}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。代入：

$$\dot{K} = \frac{3.09 \times 10^{-13} \cdot 2.1 \times 10^{11} \cdot 0.9272}{2} \approx 0.03008 \text{ Gy/h} = 30.08 \text{ mGy/h}$$

答案：照射量率 3.48 R/h , 比释动能率 30.08 mGy/h .

3. ^{90}Sr 点源容器屏蔽设计

思路：内层有机玻璃屏蔽 ^{90}Y β 射线，外层铅屏蔽轫致辐射。需计算 ^{90}Y β 射线射程（铝中经验公式，修正到有机玻璃）和轫致辐射剂量率（课件公式，查表得铅厚度）。 ^{90}Sr 衰变成 ^{90}Y ，半衰期短，平衡时总活度 $3.7 \times 10^{12} \text{ Bq}$ 为两者之和， β 射线平均能量为两者 1:1 加权。数据来自 [NNDC](#) 和课件附表 9。

内层厚度： ^{90}Y β 射线最大能量 2.2785 MeV，铝中射程：

$$R_{\text{Al}} = 0.542 \cdot 2.2785 - 0.133 = 1.102 \text{ g/cm}^2$$

铝密度 $\rho_{\text{Al}} = 2.7 \text{ g/cm}^3$, 厚度：

$$d_{\text{Al}} = \frac{1.102}{2.7} \approx 0.4081 \text{ cm}$$

有机玻璃（化学式 $(\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8)_n$, $\rho_{\text{PMMA}} = 1.18 \text{ g/cm}^3$, $Z_{\text{eff}} = 5.85$ ）有效原子量：

$$\sqrt{M_{\text{eff}}} = \frac{\frac{5}{15} \cdot 12 + \frac{2}{15} \cdot 16 + \frac{8}{15} \cdot 1}{\frac{5}{15} \cdot \sqrt{12} + \frac{2}{15} \cdot \sqrt{16} + \frac{8}{15} \cdot \sqrt{1}} \approx \frac{6.666}{2.2213} \approx 3.0$$

$$M_{\text{eff}} \approx 9.0, \quad \frac{Z}{M} \approx \frac{5.85}{9.0} \approx 0.65$$

修正厚度:

$$d_{\text{PMMA}} = \frac{13/26.98}{0.65} \cdot \frac{2.7}{1.18} \cdot 0.4081 \approx 0.692 \text{ cm}$$

外层铅厚度: 辐射剂量率 (^{90}Sr 和 ^{90}Y 平均能量 $(0.1957 + 0.9323)/2 = 0.564 \text{ MeV}$):

$$\dot{D} = 4.59 \times 10^{-8} \cdot A \cdot Z \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_a \cdot \left(\frac{\bar{E}_\beta}{R} \right)^2 \cdot e^{-\mu R_1}$$

参数: $A = 3.7 \times 10^{12} \text{ Bq}$, $Z = 5.85$, $\left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_a = 2.962 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$, $\bar{E}_\beta = 0.564 \text{ MeV}$, $R = 200 \text{ cm}$, $R_1 = 0$ 。代入:

$$\dot{D} = 4.59 \times 10^{-8} \cdot 3.7 \times 10^{12} \cdot 5.85 \cdot 2.962 \times 10^{-2} \cdot \left(\frac{0.564}{200} \right)^2 \approx 0.23402 \text{ mGy/h}$$

减弱倍数:

$$K = \frac{0.23402}{0.005} \approx 46.804$$

根据附表 9 ($E \approx 0.5 \text{ MeV}$, $K = 2 \times 10^5$, $d = 7.48 \text{ cm}$), 外推 $K = 46.804$, 铅厚度约为 2.5-3.5 cm。

答案: 有机玻璃厚度 [0.692 cm], 铅厚度 [2.5 ~ 3.5 cm].

如果将内外层材料颠倒, 内层高 Z 铅吸收 β 射线, 会产生更多辐射; 而外层低 Z 有机玻璃对 γ 屏蔽能力差, 厚度会更大。这样设计不合理。

4. ^{137}Cs 污染阀门维修铅屏蔽厚度

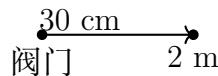


图 2: 维修点与阀门几何示意图

思路: 计算 2 m 处无屏蔽剂量率, 结合控制水平求减弱倍数, 查附表 9 得铅厚度。30 cm 处照射量率由题目给出, 换算剂量率后用距离平方反比律, 控制水平由剂量限制和时间计算, 数据来自课件。

30 cm 处剂量率 ($\dot{X}_{0.3} = 500 \text{ R/h}$, $f = 8.69 \times 10^{-3} \text{ Gy/R}$):

$$\dot{D}_{0.3} = 8.69 \times 10^{-3} \cdot 500 = 4.345 \text{ Gy/h}$$

2 m 处剂量率:

$$\dot{D}_2 = 4.345 \cdot \left(\frac{0.3}{2} \right)^2 = 0.0977625 \text{ Gy/h}$$

控制水平 (1 mSv / 4 h, $W_R = 1$):

$$\dot{D}_{\text{control}} = \frac{0.001}{4} = 0.00025 \text{ Gy/h}$$

减弱倍数:

$$K = \frac{0.0977625}{0.00025} \approx 391.05$$

对于 0.662 MeV, 查附表 9 ($K = 2 \times 10^5, d = 11.1 \text{ cm}$), 外推 $K = 391.05$, 铅厚度约为 5.5 cm。

答案: 5.5 cm.

5. Po-Be 中子源石蜡屏蔽厚度

思路: 使用分出截面法计算石蜡厚度, 需中子发射率、无屏蔽注量率和控制注量率。发射率由活度和产额计算, 注量率由几何公式得到, 控制注量率由剂量当量率线性换算, 参数来自课件。

中子发射率 ($A = 7.4 \times 10^{11} \text{ Bq}$, $y = 6.76 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1}$):

$$\delta = 7.4 \times 10^{11} \cdot 6.76 \times 10^{-5} = 5.0024 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$$

1 m 处注量率:

$$\phi_{r0} = \frac{5.0024 \times 10^7}{4\pi \cdot 100^2} \approx 398.28 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

厚度公式:

$$d = \frac{1}{\Sigma_R} \cdot \ln \left(\frac{\phi_{r0} \cdot B_n \cdot q}{\phi_L} \right)$$

参数: $\Sigma_R = 0.118 \text{ cm}^{-1}$, $B_n = 5$, $q = 1$, $\phi_L = 1.96 \cdot \frac{7.5}{2.5} = 5.88 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。代入:

$$d = \frac{1}{0.118} \cdot \ln \left(\frac{398.28 \cdot 5}{5.88} \right) \approx 49.36 \text{ cm}$$

答案: 49.4 cm.

6. $^{226}\text{Ra-Be}$ 中子源中子注量率与 γ 剂量当量率

思路: 分别计算中子注量率和 γ 剂量当量率。中子注量率由发射率和几何公式计算, γ 剂量当量率由活度、常数和距离计算, 参数来自课件。

中子发射率 ($A = 3.7 \times 10^{12} \text{ Bq}$, $y = 4.05 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1}$):

$$\delta = 3.7 \times 10^{12} \cdot 4.05 \times 10^{-4} = 1.4985 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$$

3 m 处注量率:

$$\phi = \frac{1.4985 \times 10^9}{4\pi \cdot 300^2} \approx 1326.24 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

γ 剂量当量率:

$$\dot{H} = W_R \cdot f_m \cdot \frac{A \cdot \Gamma}{R^2}$$

参数: $W_R = 1$, $f_m = 37.29 \text{ Gy kg C}^{-1}$, $\Gamma = 1.758 \times 10^{-18} \text{ C m}^2 \text{kg}^{-1}$, $R = 3 \text{ m}$ 。代入:

$$\dot{D} = 37.29 \cdot \frac{3.7 \times 10^{12} \cdot 1.758 \times 10^{-18}}{9} \cdot 3600 \approx 0.09702 \text{ Gy/h}$$

$$\dot{H} = 1 \cdot 0.09702 = 0.09702 \text{ Sv/h}$$

答案: 中子注量率 $1326.24 \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, γ 剂量当量率 97.02 mSv/h .