



中华人民共和国国家标准

GB/T 39325—2020

超导回旋质子加速器辐射屏蔽规范

Specification for radiation shielding of superconducting proton cyclotron

2020-11-19 发布

2021-06-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国核能标准化技术委员会(SAC/TC 58)提出并归口。

本标准起草单位:合肥中科离子医学技术装备有限公司、中国科学院等离子体物理研究所。

本标准主要起草人:宋云涛、徐坤、雷明准、陈永华、冯汉升、陆坤、李俊、丁开忠、刘璐、陈根、郑金星、魏江华、李实、杨庆喜、李君君、邢以翔、韩曼芬、黄漪。



超导回旋质子加速器辐射屏蔽规范

1 范围

本标准规定了超导回旋质子加速器机房屏蔽的一般要求、剂量率参考控制水平、屏蔽计算和辐射监测等要求。

本标准适用于质子能量在 70 MeV~1 000 MeV 范围内的超导回旋质子加速器的辐射屏蔽设计，也可用于质子能量在 70 MeV~1 000 MeV 范围内的其他类型质子加速器的辐射屏蔽设计。

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。

GB/T 4960.5 核科学技术术语 辐射防护与辐射源安全

GBZ/T 202—2007 用于中子外照射放射防护的剂量转换系数

3 术语和定义

GB/T 4960.5 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超导回旋质子加速器 **superconducting proton cyclotron**

采用超导磁体提供恒定导向磁场，利用常频电场加速，质子束流沿着螺旋轨道运动的圆形加速器。

3.2

居留因子 **occupancy factor**

T

辐射源在出束时间内，在区域内最大受辐照人员驻留的平均时间占出束时间的份额。

3.3

使用因子 **use factor**

U

初级辐射束(有用束)向某有用束屏蔽方向照射的时间占总照射时间的份额。

3.4

束流损失 **beam loss**

质子束流在形成、加速、引出、输运过程中，与加速器系统部件相互作用所导致的束流强度与束流能量的部分损失或者全部损失。

3.5

次级中子 **secondary neutron**

质子与物质相互作用产生的中子。

注：一般情况下，次级中子包括级联中子和蒸发中子。

3.6

级联中子 cascade neutron

质子与物质相互作用时,通过级联反应产生的中子。

注:级联中子的能量最高可达入射质子的最高能量。

3.7

蒸发中子 evaporated neutron

质子与物质相互作用时,总中子产额中除级联中子以外的中子。

注:蒸发中子的能量较低,通常在 10 MeV 以下,分布为各向同性。

3.8

屏蔽透射因子 shielding transmission factor

在某一点与辐射源之间有屏蔽和无屏蔽时,该点处辐射水平的比值。

注:屏蔽透射因子的值越小,表示屏蔽效果越好。

3.9

天空散射辐射 skyshine radiation

穿透屏蔽室顶的辐射与室顶上方空气发生作用而散射到屏蔽室外某一定距离处的辐射。

3.10

侧散射辐射 side-scattered radiation

射入屏蔽室屋顶的辐射与屋顶屏蔽物质作用所产生的并穿出屋顶散射至屏蔽室屋顶所张立体角区域外的次级辐射。

注:侧散射辐射所关心的位置为辐射源屏蔽室外一定距离处人员驻留的建筑物中高于屏蔽室屋顶的楼层。

3.11

有效衰减长度 effective attenuation length

在非带电粒子辐射束射入某种材料的路径中,将辐射剂量(率)减少至 $1/e$ 所需的材料厚度。

注: e 是自然常数。

3.12

剂量率参考控制水平 dose rate reference control level

根据辐射防护实际工作的需要,为开展辐射屏蔽设计而规定的某位置剂量率的控制水平。

4 机房屏蔽的一般要求

4.1 基本要求

4.1.1 应结合超导回旋质子加速器(以下简称“质子加速器”)的规模、功率和用途,按相关规定确定剂量约束值。

4.1.2 以剂量约束值为依据,对不同驻留区域的屏蔽进行设计,设计中应关注漏射、散射和次级射线散射的影响,并为内照射留出适当的安全裕量。

4.1.3 按照质量保证要求进行安装和运行,防止运行中临时性条件变动带来的屏蔽缺损。

4.1.4 在辐射屏蔽设计阶段,应考虑辐射防护管理和职业照射控制的辐射分区需求。

4.2 屏蔽所考虑的环境条件

4.2.1 质子加速器机房一般应设置在单独的建筑物内或作为建筑物底层的一端,质子加速器系统中靶室和辅助机房的坐落位置应考虑周围环境与场所内驻留人员的状况及其可能的改变,并应根据相关安全要求确定所需屏蔽。

4.2.2 在设计和评价质子加速器机房屋顶或靶室屋顶的屏蔽时,应充分考虑天空散射辐射和侧散射辐射对临近场所驻留人员的照射。

4.3 质子加速器机房和靶室的布局要求

4.3.1 控制室应独立于质子加速器机房设置。质子加速器系统中辅助机械、电气、水冷设备等可以与质子加速器主系统装置分离的设备,应尽量设置于质子加速器机房外。

4.3.2 控制室、相邻靶室(多靶室系统中)等具有较大居留因子的用室,应尽量避免质子束可直接照射到的区域。

4.3.3 根据场所空间和环境条件,确定机房或靶室进出口的屏蔽措施。机房进出口采用迷道设计时,迷道宽度应充分考虑安装与维护设备的通过。机房进出口采用防护门等非迷道式屏蔽手段时,应确保屏蔽的有效性和可靠性。

4.4 缝隙、贯穿孔和其他薄弱环节的屏蔽考虑

4.4.1 机房采用混凝土整体浇筑时,应采用合理的浇筑工艺,防止出现裂纹和过大的气孔。屏蔽墙体存在预留安装口时,安装口填充物与已浇筑混凝土的交接处应尽量避免出现贯穿直缝,并评估缝隙对屏蔽性能的影响。

4.4.2 机房屏蔽体采用预制件(混凝土块或钢板)时,交接处应尽量避免出现贯穿直缝,并评估缝隙对屏蔽性能的影响。

4.4.3 穿过屏蔽墙体的贯穿孔(包括通风、电气、水管等)应尽量避免控制台等人员高驻留区,并尽量采用多次弯折设计,控制孔道的辐射泄露。

5 剂量率参考控制水平

5.1 关注点的选取

5.1.1 存在辐射源的房间屏蔽墙体外,距墙体外表面 30 cm 处,选择人员受照剂量可能最大的位置作为关注点。

5.1.2 质子加速器机房和靶室上方已建、拟建的建筑物、临近建筑物的高度超过自辐射源点至质子加速器机房或靶室屋顶内表面边缘所张立体角区域内的高层建筑物中人员驻留处,选择人员受照剂量可能最大的位置作为关注点。

5.1.3 选择公众成员可能受到明显照射的其他位置作为关注点。

5.2 剂量率参考控制水平的确定

屏蔽体外关注点的剂量率参考控制水平应结合年剂量约束值、质子加速器的出束时间、使用因子和关注点的居留因子确定。剂量率参考控制水平的确定方法参见附录 A。

6 屏蔽计算

6.1 屏蔽计算方法

屏蔽计算应以剂量率参考控制水平为目标,综合考虑质子加速器参数、束流损失与辐射源、次级辐射,合理进行屏蔽体设计及计算。

6.2 屏蔽计算应考虑的因素

高能质子打靶会产生次级质子、次级中子和 γ 射线等。在最高质子能量情况下,质子加速器系统的屏蔽设计只需要考虑次级中子。在屏蔽计算时,应考虑质子加速器系统部件本身的屏蔽作用。

6.3 质子相关参数

质子相关参数包括：

- a) 质子束流损失与利用的位置和方向；
- b) 质子的能量范围；
- c) 质子的束流强度范围。

6.4 多辐射源

如果质子加速器系统中存在多个辐射源，在计算某一关注点的剂量(率)时，应同时考虑各个辐射源的贡献。

6.5 次级中子源项估算

能量为 70 MeV~1 000 MeV 的质子打击中等或高原子序数材料的次级中子产额 $Q(E)$ 按公式(1)估算：

$$Q(E) = 6 \times (E/E_0)^{0.63} \times [1 - e^{-3.6 \times (E/E_0)^{1.6}}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$Q(E)$ ——次级中子产额，无量纲；

E ——入射质子能量，单位为兆电子伏(MeV)；

E_0 ——基准能量，1 000 MeV。

次级中子的发射并不是各向同性的，距离打靶位置 1 m 处，次级中子注量 $\Phi(E, \theta)$ 沿角度的分布按公式(2)估算：

$$\Phi(E, \theta) = C_\Phi \times \frac{1 - e^{-3.6 \times (E/E_0)^{1.6}}}{(\theta/\theta_0 + 40/\sqrt{E/E_0})^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$\Phi(E, \theta)$ ——次级中子注量，单位为每平方米(m^{-2})；

C_Φ ——常数 5 000，单位为每平方米(m^{-2})；

E ——入射质子能量，单位为兆电子伏(MeV)；

E_0 ——基准能量，1 000 MeV；

θ ——次级中子出射方向与质子束流入射方向的夹角，单位为度($^\circ$)； $\theta = [0^\circ, 180^\circ]$ ；

θ_0 ——单位角度， 1° 。

在没有屏蔽结构时，距离打靶位置 1 m 处，次级中子产生的周围剂量当量 $H_0(E, \theta)$ 按公式(3)估算：

$$H_0(E, \theta) = C_H \times \frac{1 - e^{-3.6 \times (E/E_0)^{1.6}}}{(\theta/\theta_0 + 40/\sqrt{E/E_0})^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$H_0(E, \theta)$ ——周围剂量当量(以下简称“剂量”)，单位为希沃特(Sv)；

C_H ——常数 2×10^{-10} ，单位为希沃特(Sv)；

E ——入射质子能量，单位为兆电子伏(MeV)；

E_0 ——基准能量，1 000 MeV；

θ ——次级中子出射方向与质子束流入射方向的夹角，单位为度($^\circ$)； $\theta = [0^\circ, 180^\circ]$ ；

θ_0 ——单位角度， 1° 。

注：公式(3)由中子注量 $\Phi(E, \theta)$ 与注量-剂量转换因子相乘得到，注量-剂量转换因子保守取值为 $4 \times 10^{-14} \text{ Sv} \cdot \text{m}^2$ 。

束流强度为 I 的质子束产生的次级中子剂量率按公式(4)估算：

$$\dot{H}_0 = H_0 \times \frac{I}{e_1} \times C_t \dots\dots\dots (4)$$

式中：

\dot{H}_0 ——次级中子剂量率,单位为希沃特每小时(Sv/h)；

H_0 ——单个质子产生的剂量,单位为希沃特(Sv)；

I ——质子束流强度,单位为安培(A)；

e_1 ——基本电荷量, $e_1=1.60\times 10^{-19}$ C；

C_t ——时间转换因子, $C_t=3\ 600$ s/h。

注：本标准中为了区别自然常数和基本电荷量,基本电荷量用 e_1 表示。

6.6 屏蔽墙体后中子剂量率估算

当关注点与打靶位置的距离远大于质子束流与材料相互作用区域的几何尺寸(大于 7 倍)时,可将靶视为点源。

屏蔽墙体后某关注点 P(见图 1)的中子剂量率按公式(5)估算：

$$\dot{H}_P = \dot{H}_0 \times 10^{\frac{-d_{\text{eff}}}{\text{TVL}}} \times \left(\frac{r_0}{r_P}\right)^{1.5} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

\dot{H}_P ——屏蔽墙体后点 P 的中子剂量率,单位为希沃特每小时(Sv/h)；

\dot{H}_0 ——次级中子剂量率,单位为希沃特每小时(Sv/h)；

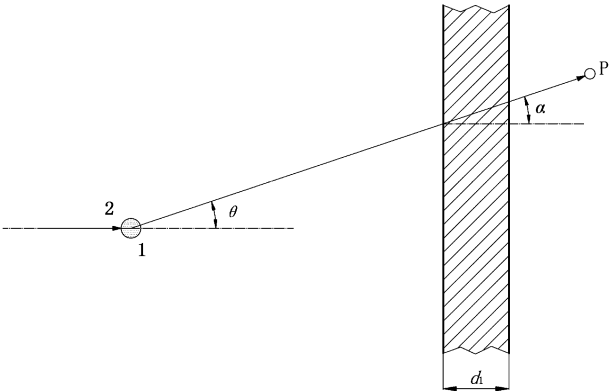
d_{eff} ——屏蔽墙体的有效厚度,有效厚度 d_{eff} 与墙体厚度 d_1 的关系为 $d_{\text{eff}}=d_1/\cos\alpha$,单位为厘米(cm)；

TVL——屏蔽材料的十分之一值层,单位为厘米(cm)；

r_0 ——单位距离,1 m；

r_P ——靶点到 P 点的距离,单位为米(m)。

注：一般地,某处剂量率与该位置和辐射源距离的平方相关,即指数数值为 2。本式中,该指数数值取 1.5,目的是为了保守估计房间墙体内壁对中子的反射作用。



说明：

1——靶点；

2——质子束流入射方向；

θ ——次级中子出射方向与质子束流入射方向的夹角；

α ——次级中子出射方向与屏蔽墙体法线的夹角；

d_1 ——屏蔽墙体的厚度；

P——屏蔽墙体后某关注点。

图 1 屏蔽墙体的示范性描述

TVL 的值与屏蔽材料、质子能量、次级中子出射方向与质子束流入射方向的相对角度有关,按公式(6)估算:

$$TVL = TVL_0 \times (1 - 0.8 \times e^{-4 \times \frac{E}{E_0}}) \times f(\theta) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

TVL ——十分之一值层,单位为厘米(cm);

TVL₀ ——质子能量为 1 000 MeV 时,材料对质子产生的次级中子的十分之一值层,单位为厘米(cm)取值,参见附录 B;

E ——入射质子能量,单位为兆电子伏(MeV);

E₀ ——基准能量,1 000 MeV;

θ ——次级中子出射方向与质子束流入射方向的夹角,单位为度(°);θ=[0°,180°];

f(θ) ——角度修正系数,无量纲。θ=[0°,45°]时,f(θ)=1;θ=[45°,90°]时,f(θ)=0.73;θ=[90°,135°]时,f(θ)=0.49;θ=[135°,180°]时,f(θ)=0.38。

6.7 天空散射中子剂量率估算

中子穿过机房屋顶,在大气的散射作用下,会反射到地面,对附近公众成员产生辐射。天空散射中子剂量率按公式(7)估算:

$$\dot{H}_s = \frac{kq}{(b+r)^2} e^{-r/\lambda} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

\dot{H}_s ——距离辐射源点 r 处的天空散射中子剂量率,单位为希沃特每小时(Sv/h);

k ——常数 2×10^{-15} ,单位为希沃特平方米(Sv·m²);

q ——单位时间内穿过机房屋顶射入天空的中子数,单位为每小时(h⁻¹),可以通过经验公式求得,参见 B.2;

b ——假设的天空散射中子源距地面的高度,b=40 m;

r ——计算点到辐射源点之间的水平距离,单位为米(m);r 的取值范围为 11 m~1 005 m;

λ ——空气对中子的有效衰减长度,单位为米(m),与中子的最高能量有关,参见 B.3。

6.8 穿墙通道中子剂量率估算

质子束与屏蔽墙体平行时,未被屏蔽的次级中子进入穿墙通道,并沿通道方向发生多次散射。

屏蔽墙体中穿墙通道(见图 2)的屏蔽透射因子 TF_w 按公式(8)估算:

$$TF_w = 10^{(\theta_M/\theta_N - \sqrt{d_2/\sqrt{A}})} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

TF_w ——屏蔽墙体中穿墙通道的屏蔽透射因子,无量纲;

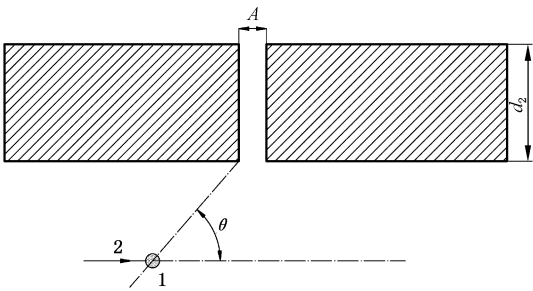
θ_M ——穿墙通道入口处,次级中子出射方向与质子束入射方向的相对最大角度,单位为度(°);

θ_N ——常数,数值为 65°;

d₂ ——墙体厚度,单位为米(m);

A ——通道截面积,单位为平方米(m²)。

注:公式(8)适用于 θ_M=[20°,70°];当 θ_M<20°时,按 20°计算;当 θ_M>70°时,次级中子可以经过通道而剂量不被减弱,此种情况需要采用迷道结构实现辐射屏蔽。



说明：
1 —— 靶点；
2 —— 质子束入射方向；
 θ —— 次级中子出射方向与质子束流入射方向的夹角；
 d_2 —— 墙体厚度；
 A —— 通道截面积。

图 2 屏蔽墙体穿墙通道的示范性描述

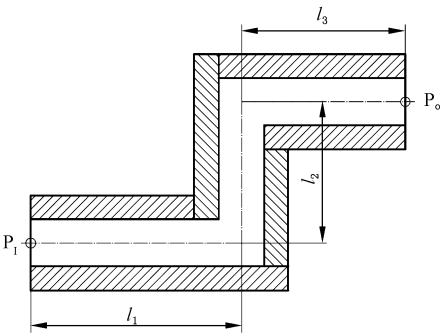
屏蔽墙体穿墙通道出口处剂量率按公式(9)估算：

$$\dot{H}_{ow} = \dot{H}_{iw} \times TF_w \dots\dots\dots (9)$$

式中：
 \dot{H}_{ow} —— 通道出口截面位置的剂量率,单位为希沃特每小时(Sv/h)；
 \dot{H}_{iw} —— 通道入口截面位置的剂量率,单位为希沃特每小时(Sv/h)；
 TF_w —— 穿墙通道的屏蔽透射因子,无量纲。

6.9 迷道中子剂量率估算

迷道式辐射防护结构由多条边组成(见图 3),每条边互相垂直,通过迷道墙体的散射作用有效屏蔽中子辐射,迷道的屏蔽透射因子 TF_L 按公式(10)估算：



说明：
 P_1 —— 迷道入口位置；
 P_0 —— 迷道出口位置；
 l_i —— 第 i 段迷道的长度, $i=1,2,3$ 。

图 3 三段式迷道示例

$$TF_L = \frac{S^{n-1}}{l_1^2} \times \frac{A_1}{A_n} \times \prod_{i=2}^n \left(\frac{\sqrt{A_i}}{l_i} \right)^3 \dots\dots\dots (10)$$

式中:

TF_L ——迷道的屏蔽透射因子,无量纲;

S ——中子散射系数,取 0.7;

n ——迷道的总段数;

l_i ——第 i 段迷道的长度,单位为米(m);

A_i ——第 i 段迷道的截面积,单位为平方米(m^2)。

经迷道减弱后的中子剂量率按公式(11)估算:

$$\dot{H}_{oL} = \dot{H}_{iL} \times TF_L \dots\dots\dots (11)$$

式中:

\dot{H}_{oL} ——迷道出口截面位置的剂量率,单位为希沃特每小时(Sv/h);

\dot{H}_{iL} ——迷道入口截面位置的剂量率,单位为希沃特每小时(Sv/h);

TF_L ——迷道的屏蔽透射因子,无量纲。

6.10 其他

6.10.1 在屏蔽结构设计计算时,应考虑计算过程的不确定度,必要时采取安全系数。

6.10.2 宜开展蒙特卡罗方法计算,验证屏蔽设计方案。采用蒙特卡罗方法进行计算时,应使用正确的几何模型,准确定义初级质子束或次级中子源、屏蔽材料的密度和元素组成;模拟计算中,中子注量与剂量转换系数采用 GBZ/T 202—2007 给出的值。

6.10.3 质子加速器辐射屏蔽估算实例参见附录 C。

7 辐射监测

7.1 监测位置

7.1.1 对选取的关注点(见 5.1)进行辐射剂量率监测。

7.1.2 质子加速器室、束流输运室、靶室以及与质子加速器应用相关的其他位置:沿屏蔽墙体外一切人员可以到达的位置,距墙外表面 30 cm 处进行辐射剂量率巡测。

7.2 监测要求

7.2.1 所有监测位置,应测量中子及 γ 射线的剂量率。

7.2.2 在质子加速器实际应用中的质子能量和束流强度范围内,监测设备应能够正常使用。

附录 A
(资料性附录)
剂量率参考控制水平

屏蔽体外关注点的剂量率参考控制水平应结合年剂量约束值、质子加速器的年出束时间、使用因子和关注点的居留因子确定,按公式(A.1)估算:

$$\dot{H}_c \leq \frac{H_c}{t_{\text{beam}} \times U \times T} \dots\dots\dots (A.1)$$

- 式中:
- \dot{H}_c ——剂量率参考控制水平,单位为希沃特每小时(Sv/h);
 - H_c ——年剂量约束值,单位为希沃特(Sv);
 - t_{beam} ——质子加速器的年出束时间,单位为小时(h);
 - U ——使用因子,无量纲;
 - T ——关注点的居留因子,无量纲;不同场合居留因子的推荐值见表 A.1。

表 A.1 不同场所的居留因子的推荐值

场所	居留因子
全居留	1
部分居留	1/2~1/5
偶尔居留	1/8~1/40
注:取自参考文献[2]和[3]。	

附 录 B
(资料性附录)
辐射屏蔽估算所需数据

B.1 不同材料对中子的 TVL_0 值

入射质子能量为 1 000 MeV 时,不同材料对次级中子的 TVL_0 值见表 B.1。

表 B.1 不同材料对次级中子的 TVL_0 值

材料	密度 g/cm ³	TVL_0 cm
普通混凝土	2.35	162
重晶石混凝土	3.2	139
铁	7.4	82
注：取自参考文献[4]。		

B.2 射入天空的中子数 q

天空散射中子剂量估算中,单位时间内穿过机房屋顶射入天空的中子数 q 可按公式(B.1)估算:

$$q = \int \frac{d^2}{g} \dot{H}(d, d_3) d\Omega \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

- q ——单位时间内穿过机房屋顶射入天空的中子数,单位为每小时(h^{-1});
- d ——辐射源点至屋顶外表面的距离,单位为米(m);
- g ——中子注量-剂量转换系数,单位为希沃特平方米($Sv \cdot m^2$),与中子的最高能量 E_c 相关,取值见表 B.2;
- $\dot{H}(d, d_3)$ ——屋顶外表面处的中子剂量率,单位为希沃特每小时(Sv/h);
- d_3 ——屋顶的厚度,单位为米(m);
- Ω ——屋顶与辐射源点所形成的立体角,单位为球面度(sr)。

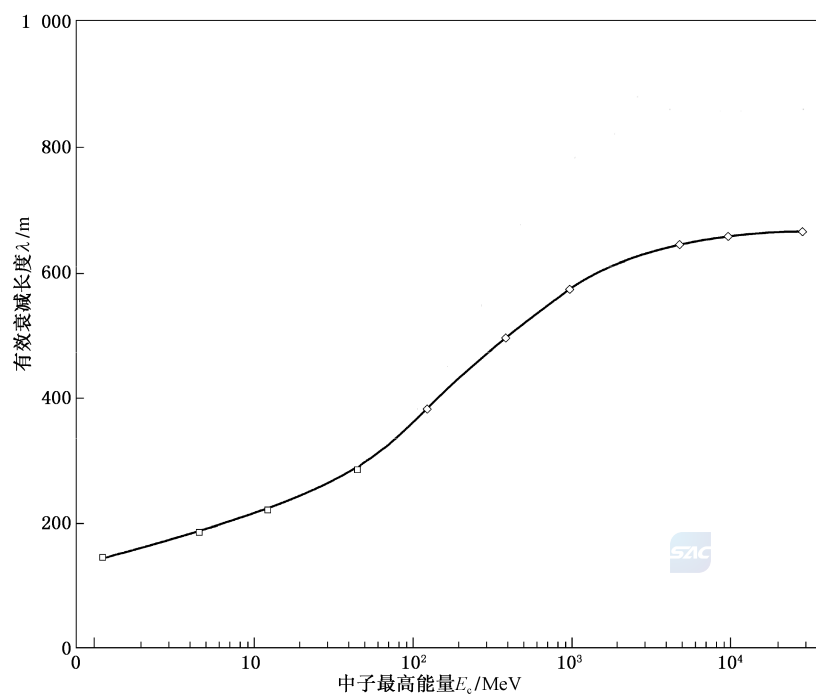
表 B.2 中子注量-剂量转换系数 g 的值

中子的最高能量 MeV	复合谱 $1 \times 10^{-15} \text{ Sv} \cdot \text{m}^2$	1/E 谱 $1 \times 10^{-15} \text{ Sv} \cdot \text{m}^2$
1.6	4.0	3.9
2.5	4.8	4.8
4.0	5.5	5.6
6.3	6.3	6.4
10.0	7.1	7.2
16.0	7.8	7.9
25.0	8.6	8.6
40.0	9.4	9.4
63.0	10.1	10.1
100.0	10.9	10.9
160.0	11.7	11.7
250.0	12.5	12.5
400.0	13.2	13.4
630.0	13.7	14.6
1 000.0	14.1	16.2
1 600.0	14.4	18.4
2 500.0	14.5	21.2
4 000.0	14.6	25.0
6 300.0	14.6	30.0
10 000.0	14.7	36.5
注 1：表 B.2 中子注量-剂量转换系数 g 的值仅用于公式(B.1)。 注 2：表 B.2 数据取自参考文献[5]。		



B.3 空气对中子的有效衰减长度

空气对中子的有效衰减长度与中子最高能量的关系见图 B.1。



注：取自参考文献[3]。

图 B.1 空气对中子的有效衰减长度与中子能量关系

附录 C

(资料性附录)

质子加速器辐射屏蔽估算实例

C.1 剂量率参考控制水平

设已给定：

- 1) 工作人员的年剂量约束值 $H_c = 5 \text{ mSv} = 5 \times 10^{-3} \text{ Sv}$;
- 2) 质子加速器的年束流时间 $t_{\text{beam}} = 2\,000 \text{ h}$;
- 3) 使用因子 $U = 1$, 某关注点 P 的居留因子 $T = 1$ 。

在上述条件下, 该点的剂量率参考控制水平 \dot{H}_c 为:

$$\dot{H}_c \leq \frac{H_c}{t_{\text{beam}} \times U \times T} = \frac{5 \times 10^{-3}}{2\,000 \times 1 \times 1} = 2.50 \times 10^{-6} \text{ Sv/h} = 2.50 \mu\text{Sv/h}$$

注: 为便于计算, 本示例后续涉及剂量、剂量率的单位统一用希沃特(Sv)、希沃特每小时(Sv/h)表示。希沃特与毫希沃特、微希沃特的换算关系为 $1 \text{ Sv} = 1 \times 10^3 \text{ mSv} = 1 \times 10^6 \mu\text{Sv}$ 。

C.2 屏蔽墙体后中子剂量率、墙体厚度

设已给定：

- 1) 能量 $E = 220 \text{ MeV}$ 、束流强度 $I = 1.6 \text{ nA} = 1.6 \times 10^{-9} \text{ A}$ 的单能质子束流打击靶体;
- 2) 关注点 P 位于质子束流方向正前方($\theta = 0^\circ$);
- 3) 为了屏蔽次级中子, 在靶点正前方设置垂直于束流方向的墙体($\alpha = 0^\circ$), 选取混凝土(密度为 2.35 g/cm^3) 作为墙体材料;
- 4) 关注点 P 的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c = 2.5 \times 10^{-6} \text{ Sv/h}$ 。

在上述条件下, 单个质子打靶产生的次级中子产额 Q 为:

$$\begin{aligned} Q(220 \text{ MeV}) &= 6 \times (E/E_0)^{0.63} \times [1 - e^{-3.6 \times (E/E_0)^{1.6}}] \\ &= 6 \times (220/1\,000)^{0.63} \times [1 - e^{-3.6 \times (220/1\,000)^{1.6}}] = 0.63 \end{aligned}$$

在靶点位置正前方 1 m 处, 次级中子注量 Φ 为:

$$\Phi(220 \text{ MeV}, 0^\circ) = C_\Phi \times \frac{1 - e^{-3.6 \times (E/E_0)^{1.6}}}{(\theta/\theta_0 + 40/\sqrt{E/E_0})^2} = 5\,000 \times \frac{1 - e^{-3.6 \times (220/1\,000)^{1.6}}}{(0/1 + 40/\sqrt{220/1\,000})^2} = 0.19 \text{ m}^{-2}$$

对应的次级中子剂量 H_0 为:

$$\begin{aligned} H_0(220 \text{ MeV}, 0^\circ) &= C_H \times \frac{1 - e^{-3.6 \times (E/E_0)^{1.6}}}{(\theta/\theta_0 + 40/\sqrt{E/E_0})^2} \\ &= 2 \times 10^{-10} \times \frac{1 - e^{-3.6 \times (220/1\,000)^{1.6}}}{(0/1 + 40/\sqrt{220/1\,000})^2} = 7.52 \times 10^{-15} \text{ Sv} \end{aligned}$$

已知质子束流的束流强度 $I = 1.6 \times 10^{-9} \text{ A}$, 产生的次级中子剂量率 \dot{H}_0 为:

$$\dot{H}_0(220 \text{ MeV}, 0^\circ) = H_0 \times \frac{I}{e_1} \times C_t = 7.52 \times 10^{-15} \times \frac{1.6 \times 10^{-9}}{1.60 \times 10^{-19}} \times 3\,600 = 0.27 \text{ Sv/h}$$

当 $\theta = 0^\circ$, 对于 220 MeV 质子打靶产生的次级中子, 混凝土的 TVL 值为:

$$\text{TVL} = \text{TVL}_0 \times (1 - 0.8 \times e^{-4 \times \frac{E}{E_0}}) \times f(\theta) = 162 \times (1 - 0.8 \times e^{-4 \times \frac{220}{1\,000}}) \times 1 = 108.00 \text{ cm}$$

墙体厚度估算方法一:初步设置混凝土墙体厚度 $d_1=300$ cm, $\alpha=0^\circ$, $d_{\text{eff}}=300/\cos(0)=300$ cm, 此时点 P 的中子剂量率 \dot{H}_P 为:

$$\dot{H}_P = \dot{H}_0 \times 10^{\frac{-d_{\text{eff}}}{\text{TVL}}} \times \left(\frac{r_0}{r_P}\right)^{1.5} = 0.27 \times 10^{\frac{-300}{108}} \times \left(\frac{1}{10}\right)^{1.5} = 1.42 \times 10^{-5} \text{ Sv/h}$$

高于该点的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c (2.5 \times 10^{-6} \text{ Sv/h})$, 增加墙体厚度至 400 cm, $d_{\text{eff}}=400/\cos(0)=400$ cm, \dot{H}_P 为:

$$\dot{H}_P = \dot{H}_0 \times 10^{\frac{-d_{\text{eff}}}{\text{TVL}}} \times \left(\frac{r_0}{r_P}\right)^{1.5} = 0.27 \times 10^{\frac{-400}{108}} \times \left(\frac{1}{10}\right)^{1.5} = 1.69 \times 10^{-6} \text{ Sv/h}$$

小于该点的剂量率参考控制水平 \dot{H}_c , 即厚度为 400 cm 混凝土墙体厚度满足屏蔽需求。

墙体厚度估算方法二:设屏蔽体厚度为 d_1 时, 根据公式(5)可以得到公式:

$$d_1 \geq \text{TVL} \times \lg \left[\frac{\dot{H}_0}{\dot{H}_c} \times \left(\frac{r_0}{r_P}\right)^{1.5} \right] \times \cos(\alpha)$$

带入相关参数的值:

$$d_1 \geq \text{TVL} \times \lg \left[\frac{\dot{H}_0}{\dot{H}_c} \times \left(\frac{r_0}{r_P}\right)^{1.5} \right] \times \cos(\alpha) = 108 \times \lg \left[\frac{0.27}{2.5 \times 10^{-6}} \times \left(\frac{1}{10}\right)^{1.5} \right] \times \cos(0^\circ) = 381.61 \text{ cm}$$

因此, 满足屏蔽要求的混凝土墙体最小厚度为 381.61 cm。

C.3 天空散射中子剂量率

设已给定:

- 1) 能量 $E=220$ MeV、束流强度 $I=1.6 \times 10^{-9}$ A 的单一质子束流水平打击靶体;
- 2) 靶室房间内部长度为 8 m、宽度为 4 m, 屋顶内表面高度为 5 m、厚度 $d_3=1.0$ m, 屋顶材料为混凝土;
- 3) 靶体位于房间中央, 离地高度 1 m。

在上述条件下, 靶点与屋顶的距离 $d=5.0$ m, 根据表 B.2 插值法得到 $g=1.22 \times 10^{-14} \text{ Sv} \cdot \text{m}^2$, 屋顶外表面某一 $d\Omega$ 对应的中子剂量率为 $\dot{H}(d, d_3)$, 代入公式(B.1), 沿屋顶外表面对该式进行积分可得:

$$q = 2.79 \times 10^{11} \text{ h}^{-1}$$

根据图 B.1, λ 的取值为 460 m, 对于 $r=11$ m 处:

$$\dot{H}_s = \frac{kq}{(b+r)^2} e^{-r/\lambda} = \frac{2 \times 10^{-15} \times 2.79 \times 10^{11}}{(40+11)^2} e^{-11/460} = 2.09 \times 10^{-7} \text{ Sv/h}$$

对于 $r=100$ m 处:

$$\dot{H}_s = \frac{kq}{(b+r)^2} e^{-r/\lambda} = \frac{2 \times 10^{-15} \times 2.79 \times 10^{11}}{(40+100)^2} e^{-100/460} = 2.29 \times 10^{-8} \text{ Sv/h}$$

C.4 穿墙通道中子剂量率

设已给定:

- 1) 墙体厚度为 $D=2$ m;
- 2) 穿墙通道的截面积 $A=0.04 \text{ m}^2 (0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m})$, 通道入口与质子束流入射方向的最大夹角 $\theta_M=45^\circ$;

3) 入口处的中子剂量率为 $\dot{H}_{\text{iW}} = 2 \times 10^{-3} \text{ Sv/h}$ 。

在上述条件下,穿墙通道的屏蔽透射因子 TF_{W} 为:

$$TF_{\text{W}} = 10^{(\theta_{\text{M}}/\theta_{\text{N}} - \sqrt{D/\sqrt{A}})} = 10^{(45/65 - \sqrt{2/\sqrt{0.04}})} = 3.40 \times 10^{-3}$$

经过穿墙通道减弱后的中子剂量率 \dot{H}_{oW} 为:

$$\dot{H}_{\text{oW}} = \dot{H}_{\text{iW}} \times TF_{\text{W}} = 2 \times 10^{-3} \times 3.40 \times 10^{-3} = 6.80 \times 10^{-6} \text{ Sv/h}$$

C.5 迷道中子剂量率

设已给定:

- 1) 三段式迷道,相邻两段迷道之间相互垂直;
- 2) 三段迷道的长度分别为 $l_1 = 3 \text{ m}$, $l_2 = 4 \text{ m}$, $l_3 = 4 \text{ m}$;三段迷道的截面积为 $A_1 = A_2 = A_3 = 4 \text{ m}^2$;

3) 入口处的中子剂量率为 $\dot{H}_{\text{iL}} = 2 \times 10^{-3} \text{ Sv/h}$ 。

在上述条件下,迷道的屏蔽透射因子 TF_{L} 为:

$$TF_{\text{L}} = \frac{S^{n-1}}{L_1^2} \times \frac{A_1}{A_n} \times \prod_{i=2}^n \left(\frac{\sqrt{A_i}}{L_i} \right)^3 = \frac{0.7^{3-1}}{3^2} \times \frac{4}{4} \times \left(\frac{\sqrt{4}}{4} \right)^3 \times \left(\frac{\sqrt{4}}{4} \right)^3 = 8.51 \times 10^{-4}$$

经过迷道减弱后的中子剂量率 \dot{H}_{oL} 为:

$$\dot{H}_{\text{oL}} = \dot{H}_{\text{iL}} \times TF_{\text{L}} = 2 \times 10^{-3} \times 8.51 \times 10^{-4} = 1.70 \times 10^{-6} \text{ Sv/h}$$



参 考 文 献

- [1] 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
 - [2] GBZ/T 201.5—2015 放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第5部分:质子加速器放射治疗机房
 - [3] NCRP Report No.144 Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities
 - [4] DIN 6875-20 Special radiotherapy equipments—Part 20: Proton therapy—Rules for construction of structural radiation protection
 - [5] Stapleton G B, Thomas R H, O'Brien K. Accelerator skyshine: tyger, tyger, burning bright[J]. Part. Accel., 1994, 44: 1-15.
-

