

中华人民共和国国家环境保护标准

HJ979 - 2018

电子加速器辐照装置 辐射安全和防护

(Radiation Safety and Protection on Electron Accelerator
Irradiation Facilities)

(发布稿)

本电子版为发布稿。请以中国环境科学出版社的正式标准文件为准。

2018-11-30发布

2019-03-01实施

生 态 环 境 部

目 次

前 言.....	I
1 适用范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 一般要求.....	1
4.1 辐射安全要求.....	1
4.2 辐射防护要求.....	2
5 电子加速器辐照装置的辐射屏蔽.....	3
5.1 屏蔽设计原则.....	3
5.2 屏蔽设计计算.....	3
6 电子加速器辐照装置的安全设计.....	3
6.1 联锁要求.....	3
6.2 安全设施.....	3
6.3 其他要求.....	4
7 日常检修（管理）及记录.....	5
7.1 装置的维护与维修.....	5
7.2 记录.....	5
附录 A 电子加速器辐照装置的屏蔽防护计算.....	7
附录 A 示例 10MeV 电子加速器辐照装置辐射屏蔽计算.....	12
附录 B 有害性气体的产生和排放计算.....	18

前 言

为贯彻《中华人民共和国放射性污染防治法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，保护环境，保障人体健康，规范电子加速器（电子束和 X 射线）辐照装置的辐射安全，制定本标准。

本标准规定了电子加速器（电子束和 X 射线）辐照装置的辐射安全和防护原则，包括剂量控制、辐射工作场所的划分、辐射屏蔽、安全设计、日常检修（管理）及记录等要求。

本标准技术内容参照了国际原子能机构（IAEA）《伽马、电子束和 X 射线辐照装置的辐射安全》（IAEA SSG-8，2010 年），参考了国际国内标准，并结合了我国辐射加工的实践编制。

本标准的附录 A、附录 B 是资料性附录。

本标准由生态环境部辐射源安全监管司提出。

本标准由生态环境部核设施安全监管司、科技标准司组织制订。

本标准主要起草单位：北京三强核力辐射工程技术有限公司、环境保护部核与辐射安全中心、北京市环境保护局、山东蓝孚高能物理技术股份有限公司、中广核中科海维科技发展有限公司、中国原子能科学研究院以及中国核电工程有限公司。

本标准生态环境部 2018 年 11 月 30 日批准。

本标准自 2019 年 3 月 1 日起实施。

本标准由生态环境部解释。

电子加速器辐照装置辐射安全和防护

1 适用范围

本标准规定了电子加速器（电子束和 X 射线）辐照装置的辐射安全和防护原则，包括剂量控制、辐射工作场所的划分、辐射屏蔽、安全设计、日常检修（管理）及记录等要求。

本标准适用于辐射加工用能量不高于 10MeV 的电子束辐照装置和能量不高于 5MeV 的 X 射线辐照装置。自屏蔽辐照装置不适用于本标准。

2 规范性引用文件

本标准内容引用了下列文件或其中的条款。凡是不注明日期的引用文件，其有效版本适用于本标准。

GB3095 环境空气质量标准

GB5172 粒子加速器辐射防护规定

GB18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

GBZ2.1 工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素

GBZ2.2 工作场所有害因素职业接触限值 第 2 部分：物理因素

3 术语和定义

3.1 电子加速器辐照装置 electron accelerator irradiation facilities

由电子加速器、辐照室、传输设备、安全设施和控制系统等组成，用来实现辐射加工工艺的装置。

3.2 束下装置 under beam equipment

指束流引出窗下（外），物料输运装置中接受辐照的独立控制单元。

3.3 主机室 main machine room

安置电子加速器电子束产生装置（电子枪）和束流加速结构（如加速管）等设备的场所。

3.4 辐照室 irradiation room

电子加速器发出射线形成辐射场，用以完成辐射加工工艺过程的场所。

3.5 联锁 interlock

指电子加速器在某种特定危险状态时能立即自动切断电源或束流，且在不满足设定安全条件下确保不能产生射线的电气装置。

3.6 十分之一值层 tenth-value layer

也称十分之一值厚度。当置于某种射线束路径上能使辐射水平降至1/10的指定材料的厚度。它又可分为第一个十分之一值层和其后的十分之一值层，后者称为平衡十分之一值层。

4 一般要求

4.1 辐射安全要求

4.1.1 安全原则

4.1.1.1 纵深防御

应对电子加速器辐照装置的应用及其潜在照射的大小和可能性采取相适应的多层防护与安全措施（即纵深防御），以确保当某一层级的防护措施失效时，可由下一层级的防护措施予以弥补或纠正，达到：

- （1）防止可能引起照射的事故；
- （2）减轻可能发生的任何类似事故的后果；
- （3）在任何这类事故之后，将装置恢复到安全状态。

4.1.1.2 冗余性

采用的物项应多于为完成某一安全功能所必须的最少数目的物项，在运行过程中万一某物项失效或不起作用的情况下可使其整体不丧失功能。例如辐照室和主机室的人员出入口应设3道及以上连锁。

4.1.1.3 多元性

多元性能够提高装置的安全可靠性，可以降低共因故障。系统多元性和多重剂量监测可以采用不同的运行原理、不同的物理变量、不同的运行工况、不同的元器件等。例如：辐照室和主机室的人员出入口的安全连锁可以分别采用机械的、电气的、电子的和剂量的连锁。

4.1.1.4 独立性

独立性是指某一安全部件发生故障时，不会造成其它安全部件的功能出现故障或失去作用。通过功能分离和实体隔离的方法使安全机构获得独立性。为提高系统的独立性，可采取下列措施：

- （1）保证冗余性（多道连锁）各部件之间的独立性；
- （2）保证纵深防御各部件之间的独立性；
- （3）保证多元性各部件之间的独立性；
- （4）保证安全重要物项和非安全重要物项之间的独立性。

4.1.2 辐射工作场所的分区

按照 GB18871 的规定，电子加速器辐照装置的工作场所分为：

控制区，如主机室和辐照室及各自出入口以内的区域；

监督区，如设备操作室、未被划入控制区的电子加速器辐照装置辅助设施区和其他需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域。

4.1.3 在控制区出入口处和其它必要的地方，应设立醒目的、符合 GB18871 规定的警告标志。

4.1.4 使用手册、操作规程和应急程序等文件以及关键的安全部件标识和安全标识都应使用中文。

4.2 辐射防护要求

4.2.1 辐射防护原则

（1）辐射实践的正当性

电子加速器辐照装置的建设立项，必须进行正当性分析，以确定其该项目的正当性。

（2）辐射防护的最优化

电子加速器辐照装置的设计和建造要求所有照射剂量都保持在规定的限值以内，并在考虑社会和经济因素之后，个人受照剂量的大小、受照射的人数以及受照射的可能性均应保持在可合理达到的尽量低的水平，即ALARA（As Low As Reasonably Achievable）原则。

（3）个人剂量约束

辐射工作人员职业照射和公众照射的剂量限值应满足GB18871的要求。

在电子加速器辐照装置的工程设计中，辐射防护的剂量约束值规定为：

- a) 辐射工作人员个人年有效剂量为5mSv；
- b) 公众成员个人年有效剂量为0.1mSv。

4.2.2 辐射屏蔽设计依据

电子加速器辐照装置的屏蔽设计必须以加速器的最高能量和最大束流强度为依据。

电子加速器辐照装置外人员可达区域屏蔽体外表面30cm处及以外区域周围剂量当量率不能超过2.5μSv/h。如屏蔽体外为社会公众区域，屏蔽设计必须符合公众成员个人剂量约束值规定。

本标准适用的能量不高于10MeV的电子束和能量不高于5MeV的X射线，在辐射屏蔽设计中不需要考虑所产生的中子防护问题。

5 电子加速器辐照装置的辐射屏蔽

5.1 屏蔽设计原则

电子加速器辐照装置在屏蔽设计时，不仅要考虑最大束流功率时的屏蔽要求，在能量和束流强度可调情况下，还要考虑在最大能量和/或最大束流强度组合下的屏蔽差异。

5.2 屏蔽设计计算

5.2.1 屏蔽设计计算应包括：辐照室和主机室及各自迷道、屋顶、孔洞等。

5.2.2 屏蔽设计和计算结果应在设计文件中加以说明。

5.2.3 电子加速器辐照装置的屏蔽计算方法可参见附录A。对于专用X射线辐照装置，应根据加速器厂商提供的转换靶参数或X射线发射率进行计算。对于既可用于电子束辐照也可用于X射线辐照的辐照装置，应按照电子加速器辐照装置的屏蔽计算方法计算。

6 电子加速器辐照装置的安全设计

6.1 联锁要求

在电子加速器辐照装置的设计中必须设置功能齐全、性能可靠的安全联锁保护装置，对控制区的出入口门、加速器的开停机和束下装置等进行有效联锁和监控。

安全联锁引发加速器停机时必须自动切断高压。

安全联锁装置发生故障时，加速器不能运行。安全联锁装置不得旁路，维护与维修后必须恢复原状。

6.2 安全设施

- （1）钥匙控制。加速器的主控钥匙开关必须和主机室门和辐照室门联锁。如从控制台上取出该钥匙，加速器应自动停机。该钥匙必须与一台有效的便携式辐射监测报警仪相连。在运行中该钥匙是唯一的且只能由运行值班长使用；

- (2) 门机联锁。辐照室和主机室的门必须与束流控制和加速器高压联锁。辐照室门或主机室门打开时,加速器不能开机。加速器运行中门被打开则加速器应自动停机;
- (3) 束下装置联锁。电子加速器辐照装置的控制与束下装置的控制必须建立可靠的接口和协议文件。束下装置因故障偏离正常运行状态或停止运行时,加速器应自动停机;
- (4) 信号警示装置。在控制区出入口处及内部应设置灯光和音响警示信号,用于开机前对主机室和辐照室内人员的警示。主机室和辐照室出入口设置工作状态指示装置,并与电子加速器辐照装置联锁;
- (5) 巡检按钮。主机室和辐照室内应设置“巡检按钮”,并与控制台联锁。加速器开机前,操作人员进入主机室和辐照室按序按动“巡检按钮”,巡查有无人员误留。
- (6) 防人误入装置。在主机室和辐照室的人员出入口通道内设置三道防人误入的安全联锁装置(一般可采用光电装置),并与加速器的开、停机联锁;
- (7) 急停装置。在控制台上和主机室、辐照室内设置紧急停机装置(一般为拉线开关或按钮),使之能在紧急状态下终止加速器的运行。辐照室及其迷道内的急停装置应采用拉线开关并覆盖全部区域。主机室和辐照室内还应设置开门机构,以便人员离开控制区;
- (8) 剂量联锁。在辐照室和主机室的迷道内设置固定式辐射监测仪,与辐照室和主机室的出入口门等联锁。当主机室和辐照室内的辐射水平高于仪器设定的阈值时,主机室和辐照室门无法打开;
- (9) 通风联锁。主机室、辐照室通风系统与控制系统联锁,加速器停机后,只有达到预先设定的时间后才能开门,以保证室内臭氧等有害气体浓度低于允许值;
- (10) 烟雾报警。辐照室应设置烟雾报警装置,遇有火险时,加速器应立即停机并停止通风。

6.3 其他要求

6.3.1 电气系统

- (1) 必须按加速器装置及厂房建设和公用工程的供电条件设计,确保电压电流的稳定度。
- (2) 主机室、辐照室、控制室应设置应急照明系统。
- (3) 各供电系统及相关设备应有可靠的接地系统。
- (4) 凡有高压危险的部位,应设置高压联锁、高压放电保护装置。

6.3.2 给水系统

- (1) 应根据加速器装置总用水要求,提供有一定裕量的水流量和水压。
- (2) 根据加速器装置和束下装置等设备工艺要求的水质、水温、热交换负荷进行设计。

6.3.3 通风系统

- (1) 主机室和辐照室应设置通风系统,以保证辐照分解产生的臭氧等有害气体浓度满足 GBZ2.1 的规定。有害气体的排放应满足 GB3095 的规定。
- (2) 臭氧的产生和排放,其计算模式和参数见附录 B。
- (3) 辐照室内的主排气口应设置在易于排放臭氧的位置,例如扫描窗下方的位置。

- (4) 排风口的高度应根据 GB3095 的规定、有害气体排出量和辐照装置附近环境与气象资料计算确定。

6.3.4 防火系统

辐照室和主机室的耐火等级应不低于二级，并设置火灾报警装置和有效的灭火设施。

7 日常检修（管理）及记录

7.1 装置的维护与维修

辐照装置营运单位必须制定辐照装置的维护检修制度，定期巡视检查（检验）每台加速器的主要安全设备，保持辐照装置主要安全设备的有效性和稳定性。

安全设施的变更，需经设计单位认可，并经监管部门同意后才能进行。

7.1.1 日检查

电子加速器辐照装置上的常用安全设备应每天进行检查，发现异常情况时必须及时修复。常规日检查项目应至少包括下列内容：

- (1) 工作状态指示灯、报警灯和应急照明灯；
- (2) 辐照装置安全联锁控制显示状况；
- (3) 个人剂量报警仪和便携式辐射监测仪器工作状况。

7.1.2 月检查

电子加速器辐照装置上的重要安全设备或安全程序应每月定期进行检查，发现异常情况时必须及时修复或改正。月检查项目至少应包括：

- (1) 辐照室内固定式辐射监测仪设备运行状况；
- (2) 控制台及其他所有紧急停止按钮；
- (3) 通风系统的有效性；
- (4) 验证安全联锁功能的有效性；
- (5) 烟雾报警器功能正常。

7.1.3 半年检查

电子加速器辐照装置的安全状况应每 6 个月定期进行检查，发现异常情况时必须及时采取改正措施。其检查范围至少应包括：

- (1) 配合年检的检测；
- (2) 全部安全设备和控制系统运行状况。

7.2 记录

辐照装置营运单位必须建立严格的运行及维修维护记录制度，运行及维修维护期间应按规定完成运行日志的记录，记录与装置有关的重要活动事项并保存日志档案。记录事项一般不少于下列内容：

- (1) 运行工况；
- (2) 辐照产品的情况；
- (3) 发生的故障及排除方法；
- (4) 外来人员进入控制区情况；
- (5) 个人剂量计佩戴情况；

- (6) 个人剂量、工作场所和周边环境的辐射监测结果；
- (7) 检查及维修维护的内容与结果；
- (8) 其它。

附录 A 电子加速器辐照装置的屏蔽防护计算

(资料性附录, 依据 NCRP-51 和 NCRP-151 报告)

A.1 辐射源项

电子束轰击靶、各结构材料和辐照产品都会产生韧致辐射 (X 射线), X 射线是电子加速器辐照装置辐射防护设计中的主要辐射源。

表 A.1 给出了单能电子入射到高 Z 厚靶 ($Z > 73$) 上, 在距靶 1 米处的 X 射线发射率 Q 。

表 A.1 X 射线发射率 (单位: $\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)

入射电子能量 (MeV)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.5	10.0
前向 0°	0.008	0.26	1.3	3.3	7.0	14.0	30.0	63.2	170	450
侧向 90°	0.07	0.4	1.0	1.6	2.5	3.2	4.8	6.5	10.0	13.5

X 射线穿过物质时呈近似指数规律衰减, 屏蔽计算时首先须确定 X 射线的透射比 B_x , 使剂量率在经过该屏蔽体厚度后, 按该透射比的值减弱到允许值。

A.2 直射 X 射线的屏蔽

A.2.1 确定 X 射线的透射比 B_x

$$B_x = (1 \times 10^{-6}) \left[\frac{H_M d^2}{D_{10} T} \right] \quad (\text{A-1})$$

式中:

B_x ——X 射线的屏蔽透射比, 指在屏蔽体入射面的吸收剂量率, 经屏蔽厚度按该透射比减弱, 使屏蔽体的出射面剂量率达到所要求的水平;

H_M ——参考点最大允许周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$);

d ——X 射线源与参考点之间的距离 (m);

T ——居留因子。当参考点位置为人员全居留时取值 1, 部分居留时可取 1/4, 偶然居留时可取 1/16。

常数 (1×10^{-6}) 为单位转换系数。

D_{10} ——距离 X 射线辐射源 1m 处的标准参考点的吸收剂量率 ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

$$D_{10} = 60 \cdot Q \cdot I \cdot f_e \quad (\text{A-2})$$

式中:

Q ——X 射线发射率 ($\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$);

I ——电子束流强度 (mA);

f_e ——X 射线发射率修正系数。

表 A.1 中给出的数据是电子束打高 Z 靶的数据, 通常被辐照的物质很少为高 Z 材料, 因此需要对靶进行修正。被辐照的靶材料为“铁、铜”时, 0° 方向的修正系数 f_e 为 0.7, 90° 方向的修正系数 f_e 为 0.5; 被辐照的靶材料为“铝、混凝土”时, 0° 方向的修正系数 f_e 为 0.5, 90° 方向的修正系数 f_e 为 0.3。

A.2.2 屏蔽厚度的求解

屏蔽厚度的计算可以采用两种方法：曲线图解法和十分之一值层法。这里仅给出十分之一值层法，曲线图解法可在 NCRP-51 报告中查到。

用屏蔽材料的十分之一值层来表示屏蔽厚度

$$B_x = 10^{-n} \text{ 或 } n = \log_{10}(1/B_x) \quad (\text{A-3})$$

计算屏蔽体厚度，可以保守地估算为：

$$S = T_l + (n-1)T_e \quad (\text{A-4})$$

式中：

S ——屏蔽体厚度(cm)；

T_l ——在屏蔽厚度中，朝向辐射源的第一个十分之一值层(cm)；

T_e ——平衡十分之一值层，该值近似于常数(cm)；

n ——为十分之一值层的个数。

表 A.2、A.3 给出普通混凝土、钢和铅的 T_l 和 T_e 值。

表 A.2 宽束 X 射线在几种主要材料中的第一个十分之一值层厚度 (单位：cm)

入射电子能量(MeV)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.5	10.0
混凝土	15.2	18.5	20.4	22.1	24.2	26.1	30.5	32.5	36.8	41
铁	3.8	5.5	6.8	7.7	8.3	8.7	9.2	9.7	10.3	10.5
铅	0.5	1.5	2.6	3.35	4.7	4.5	5.0	5.3	5.6	5.7

表 A.3 宽束 X 射线在几种主要材料中的平衡十分之一值层厚度 (单位：cm)

入射电子能量(MeV)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.5	10.0
混凝土	11.9	15.0	18.3	20.1	22.5	24.7	30.5	32.5	36.8	38.6
铁	3.3	5.0	6.2	7.0	7.7	8.2	9.2	9.7	10.3	10.5
铅	1.2	2.6	3.65	4.2	4.1	4.9	5.3	5.5	5.7	5.6

A.2.3 侧向 X 射线的屏蔽

对于电子加速器辐照装置，很多情况下需要考虑侧向（相对电子束 90°方向）X 射线的屏蔽，此时应将等效入射电子能量作为侧向入射电子的能量，如下表 A.4 所示，然后按等效入射电子能量的特性参数，根据直射 X 射线屏蔽的方法进行计算。

表 A.4 90° 方向电子的相应等效能量 (单位：MeV)

入射电子能量	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.5	10.0
等效入射电子能量	0.7	1.0	1.3	1.6	1.9	2.5	3.1	4.6	6.0

A.3 散射辐射的屏蔽

在加速器装置的屏蔽设计中，有三种情况必须考虑散射辐射：

(1) 迷道和防护门；

(2) 天空反散射;

(3) 孔道。

A. 3. 1 迷道和防护门

A. 3. 1. 1 防护电子的迷道, 为防止电子在迷道入口处的照射, 最简单的屏蔽方法是使迷道路径长度大于电子在空气中的射程, 这个长度可以是迷道的直线距离, 或者是迷道中最短的几个中间距离之和。

A. 3. 1. 2 防护 X 射线的迷道, 下面的计算方法可保守地估算迷道外入口的剂量率:

$$H_{1,j} = \frac{D_{10} \alpha_1 A_1 (\alpha_2 A_2)^{j-1}}{(d_1 \cdot d_{r1} \cdot d_{r2} \dots d_{rj})^2} \quad (\text{A-5})$$

式中:

α_1 ——入射到第一个散射体的 X 射线的散射系数;

α_2 ——从以后的物质散射出来的 0.5MeV 的 X 射线的散射系数(假设对以后所有散射过程是相同的);

A_1 ——X 射线入射到第一散射物质的散射面积 (m^2);

A_2 ——迷道的截面积 (m^2 , 假设整个迷道的截面积近似常数, 高宽之比在 1~2 之间);

d_1 ——X 射线源与第一散射物质的距离(m);

$d_{r1}, d_{r2} \dots d_{rj}$ ——沿着迷道长轴的中心线距离; $d_{rj} / A_2^{1/2}$ 的比值应在 1~6 之间;

j ——指第 j 个散射过程。

在任何迷道的设计中, 沿 X 射线源方向的线路, 所设计迷道墙厚度的总和应不小于直射所需屏蔽墙的厚度。

A. 3. 1. 3 防护门

(1) 设有防护门的加速器装置, 门的关闭必须确保门外人员的辐射安全;

(2) 加速器门的结构材料最常用的有混凝土、钢和铅。由于铅易变形, 通常安装在钢结构上, 或夹在两层钢板中间;

(3) 门与入口要有足够的搭接, 在门的顶部和两边至少重叠10倍于门与墙之间的缝隙。门可安装在门洞内侧, 以减少边界辐射泄露问题;

(4) 门的底部存在辐射漏束, 需要根据具体情况进行防护;

(5) 重型屏蔽门应由电气、液压、或气动装置驱动, 并设置有防止夹人功能。

A. 3. 2 天空反散射

加速器产生的辐射源通过屋顶泄漏, 再经过天空中大气的反散射, 返回至加速器周围的地面附近, 形成附加的辐射场, 这种现象称为天空反散射。

A. 3. 2. 1 天空反散射的计算

根据 NCRP-151 号报告, 计算公式为

$$H = \frac{2.5 \times 10^{-2} \left(B_{xs} \dot{D}_{10} \Omega^{1.3} \right)}{(d_i d_s)^2} \quad (\text{A-6})$$

式中:

H ——在距离 X 射线辐射源 d_s 处地面, 天空反散射的 X 射线周围剂量当量率 ($\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$);

B_{XS} ——X 射线屋顶的屏蔽透射比；

Ω —— 由 X 射线源与屏蔽墙对向的立体角 (Sr)；

d_i —— 在屋顶上方 2m 处离靶的垂直距离 (m)；

d_s —— X 射线源至 P 点的距离 (m)。

A.3.2.2 厂房屋顶厚度

屋顶的屏蔽透射比 B_{xs} 为：

$$B_{xs} = 4 \times 10^{-5} \left[\frac{H_M d_i^2 d_s^2}{D_{10} \Omega^{1.3}} \right] \quad (A-7)$$

式中：

H_M ——P 点所在位置的最大允许周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)。

计算出屋顶屏蔽透射比 B_{xs} 后，按上述十分之一值层求解法计算出屋顶的屏蔽厚度。

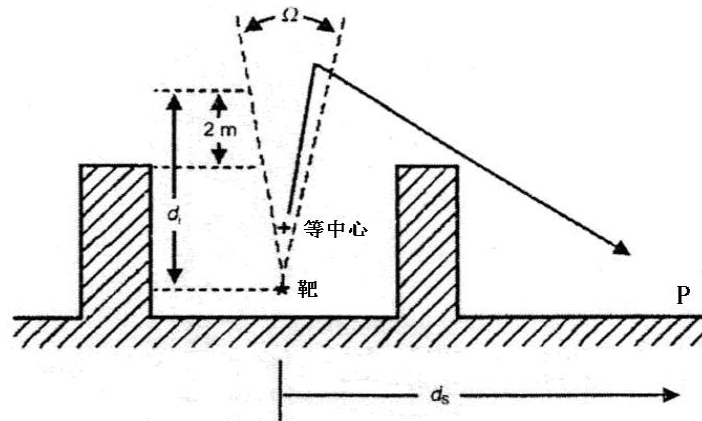


图 A.1 X 射线天空反散射示意图

A.3.2.3 X 射线通过屋顶的侧向散射

当加速器近邻有高层建筑时，则 X 射线通过屋顶后侧向散射对建筑物造成辐射影响，见图 A.2。

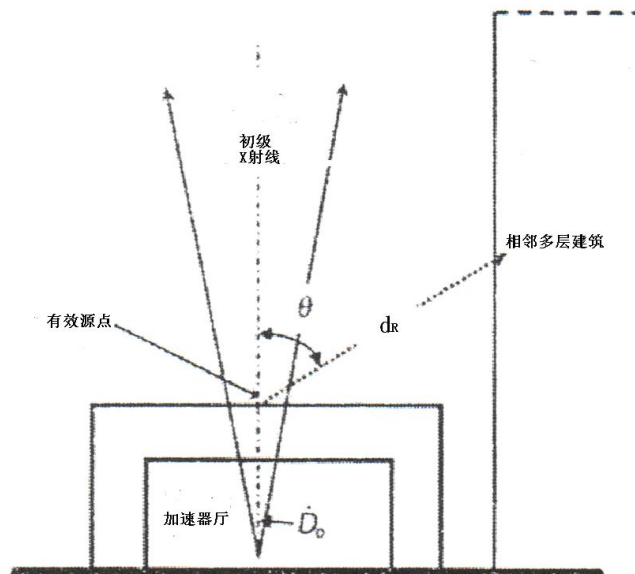


图 A.2 X 射线的侧向散射

通过混凝土屋顶 X 射线的侧向散射可用以下经验公式计算：

$$H = \frac{D_{10} F f(\theta)}{d_R^2 10^{I + \left[\frac{(t-T_l)}{T_e} \right]}} \quad (\text{A-8})$$

式中：

H —— X 射线侧向散射周围剂量当量率 ($\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)；

D_{10} —— 靶上方 1 米处 X 射线的吸收剂量率 ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)；

F —— 靶上方 1 米处照射野的面积 (m^2)；

$f(\theta)$ —— 由表 A.5 中给出的 X 射线的角度分布函数；

d_R —— 从屋顶上方束流中心到关注点的距离 (m)；

t —— 屋顶的厚度 (m)；

T_l 、 T_e 分别为屋顶屏蔽材料的第一个和平衡十分之一值层 (m)。

表 A.5 X 射线的角度分布函数 $f(\theta)$

角度(θ)	角度分布函数 $f(\theta)$
20	0.38
30	0.26
40	0.16
50	0.10
60	0.065
70	0.035
80	0.014
85	0.005

A. 4 主机室的屏蔽

电子加速器辐照装置设备设计制造单位提供加速器在主机室的束流损失，按此值根据 A.2、A.3 方法计算主机室的屏蔽设计。

附录 A 示例 10MeV 电子加速器辐照装置辐射屏蔽计算

1. 基本参数

1.1 加速器参数

电子加速器的电子束能量为 10MeV，电子束流强度为 2mA，束流功率为 20 kW。

1.2 辐照室、主机室结构尺寸

辐照室内净空尺寸为长 17m×宽 7.5m×高 2.2m，最外侧迷道的高度为 1.7 米，屏蔽墙均采用普通混凝土。辐照室周围布置有辐照加工区、风机房、配电房、其他辅助用房等（见图 A.3）。

主机室内净空尺寸为长 8.3m×宽 5.0m×高 8.0m，屏蔽墙均采用普通混凝土，门口处安装铅防护门。周围布置有水冷室、控制室、其他辅助用房等（见图 A.4）。

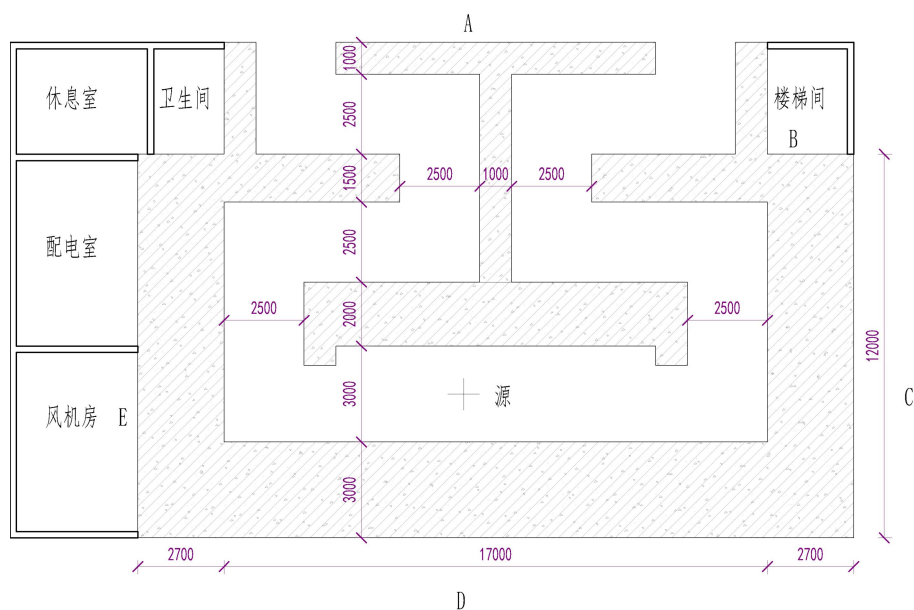


图 A.3 辐照室及直射辐射计算点

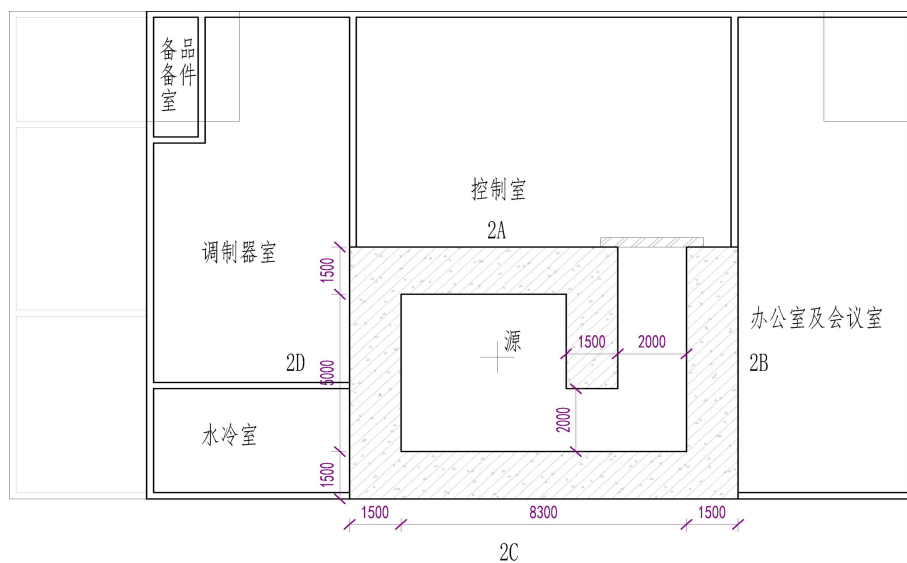


图 A.4 主机室及直射辐射计算点

2. 屏蔽计算

2.1 厂房屏蔽墙计算

2.1.1 X射线发射率

(1) 辐照室 X射线发射率

此处计算的是 X 射线侧向屏蔽, 因此需要给出 10MeV 电子侧向 (90° 方向) X 射线发射率, 根据附录 A 表 A.1, 10MeV 入射电子在距靶 1 米处侧向 90° 的 X 射线发射率为 13.5 Gy·m²·mA⁻¹·min⁻¹, 保守计算考虑, X 射线发射率修正系数在示例中取值为 1。

当束流强度为 2mA, 则根据附录 A 公式 (A-2), 辐照室距离 X 射线辐射源 1m 处的标准参考点的吸收剂量率为:

$$D_{10}(90^\circ)=60 \times 13.5 \times 2 \times 1 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}=1.62 \times 10^3 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$$

依据附录 A 表 A.4, 10MeV 电子在侧向屏蔽能量取相应等效能量为 6MeV。

(2) 主机室加速器束流损失所致 X 射线发射率

不同类型的电子加速器在加速过程中的束流损失有很大差异, 其资料应由设计单位或生产厂家提供。本计算设定束流损失率为 2% (即电子束流强度为 4×10⁻²mA), 束流损失点的能量为 3MeV。根据附录 A 表 A.1, 3MeV 入射电子在距靶 1 米处侧向 90° 的 X 射线发射率 3.2 Gy·m²·mA⁻¹·min⁻¹, 保守计算考虑, X 射线发射率修正系数在示例中取值为 1。

当束流强度为 4×10⁻²mA, 则根据附录 A 公式 (A-2), 主机室距离 X 射线辐射源 1m 处的标准参考点的吸收剂量率为:

$$D_{10}(90^\circ)=60 \times 3.2 \times 4 \times 10^{-2} \times 1 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}=7.68 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$$

依据附录 A 表 A.4, 3MeV 入射电子在侧向屏蔽能量取相应等效能量 1.9MeV。

2.1.2 透射比 B_x 的计算

根据附录 A 公式 (A-1), 其中参考点 (距离屏蔽体外侧 0.3 米处) 最大允许周围剂量当量率 (μSv·h⁻¹) H_M 取 2.5, 居留因子 T 保守取 1, 计算出 X 射线的透射比 B_x 见表 A.6。

表 A.6 直射辐射屏蔽透射比计算结果

楼层	参考点	位置	距离 d (m)	D ₁₀ (Gy·h ⁻¹)	H _M (μSv·h ⁻¹)	T	B _x
一层 辐照室 周围	A	生产作业区	11.3	1.62×10 ³	2.5	1	1.97×10 ⁻⁷
	B	楼梯间	12.4	1.62×10 ³	2.5	1	2.37×10 ⁻⁷
	C	东墙外车道	12.5	1.62×10 ³	2.5	1	2.41×10 ⁻⁷
	D	南墙外车道	4.8	1.62×10 ³	2.5	1	3.56×10 ⁻⁸
	E	风机房	10.5	1.62×10 ³	2.5	1	1.70×10 ⁻⁷
二层 主机室 周围	2A	控制室	3.8	7.68	2.5	1	4.70×10 ⁻⁶
	2B	办公室及会议室	7.3	7.68	2.5	1	1.73×10 ⁻⁵
	2C	南墙外车道	4.8	7.68	2.5	1	7.50×10 ⁻⁶
	2D	调制器室	4.6	7.68	2.5	1	6.89×10 ⁻⁶

2.1.3 屏蔽厚度的计算

首先根据附录 A 公式 (A-3), 采用表 A.6 中的 B_x 值, 计算出 n 值。

再由附录 A 表 A.2 和表 A.3 查出混凝土的 T₁ 和 T_e 值: 对于辐照室, 入射电子能量为 6MeV, 混凝土的 T₁ 和 T_e 值分别为 T₁=35.5cm, T_e=35.5cm; 对于主机室当入射电子能量为

1. 9MeV 时，混凝土的 T_1 和 T_e 值分别为 $T_1=22.1\text{cm}$ ， $T_e=20.1\text{cm}$ 。

最后根据附录 A 公式 A-4 计算出对应混凝土的厚度见表 A.7。

表 A. 7 直射辐射屏蔽墙厚度计算结果

楼层	参考点	位置	Bx	n	混凝土厚度 (m)
一层 辐照室 周围	A	生产作业区	1.97×10^{-7}	6.71	2.38
	B	楼梯间	2.37×10^{-7}	6.62	2.35
	C	东墙外车道	2.41×10^{-7}	6.62	2.34
	D	南墙外车道	3.56×10^{-8}	7.45	2.64
	E	风机房	1.7×10^{-7}	6.77	2.40
二层 主机室 周围	2A	控制室	4.7×10^{-6}	5.33	1.09
	2B	办公室及会议室	1.73×10^{-5}	4.76	0.98
	2C	南墙外车道	7.5×10^{-6}	5.12	1.05
	2D	调制器室	6.89×10^{-6}	5.16	1.06

由图 A. 3 和图 A. 4 可知，辐照室及主机室直射辐射屏蔽墙的设计厚度均大于计算结果，满足防护要求。

2. 2 迷道散射计算

根据附录 A 公式 (A-5)，对于能量大于 3 MeV 的 X 射线认为其散射一次后的能量均为 0.5 MeV；对于初级 X 射线，散射系数 α_1 取值 5×10^{-3} ，对于一次散射后的 X 射线散射系数 α_2 （假设一次散射后的反射过程一样， $E=0.5\text{ MeV}$ ）取值为 2×10^{-2} 。辐照室迷道散射计算的 D_{10} 取值为： $D_{10}(90^\circ)=1.62 \times 10^3\text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

辐照室迷道散射面积的确定： A_1 为第一次散射宽度与高度的乘积，之后的散射面积均为迷道宽度与高度的乘积，根据图 A.5，对于 G 点： $A_1=(2.85+3.68) \times 2.2=14.4\text{m}^2$ ；对于 H 点： $A_1=(2.72+3.68) \times 2.2=14.1\text{m}^2$ ， $A_2=A_3=2.5 \times 2.2=5.5\text{ m}^2$ ， $A_4=A_5=2.5 \times 1.7=4.25\text{ m}^2$ ；第一个散射面的散射点保守地取在靠近迷道处。

主机室迷道散射计算的 D_{10} 取值为： $D_{10}(90^\circ)=7.68\text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ，根据图 A.6，其第一散射面积 $A_1=2.89 \times 8=23.1\text{m}^2$ 。

辐照室和主机室的迷道散射计算结果见表 A.8。

表 A. 8 迷道散射计算结果

楼层	参考点	散射次数 j	路径 $d_i, d_{r1} \cdots d_{rj}$	辐射剂量率 $\mu\text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1}$
一楼 辐照室	G	5	6.25, 4.75, 5.5, 4.0, 4.5, 2.25	2.33×10^{-4}
	H	5	8.25, 4.75, 5.5, 4.0, 4.5, 2.25	1.30×10^{-4}
二楼主机室	2E	1	4.5, 5.5	1.45×10^{-3}

注：图中参考点位于屏蔽门内，还应考虑 X 射线直射剂量的叠加影响。

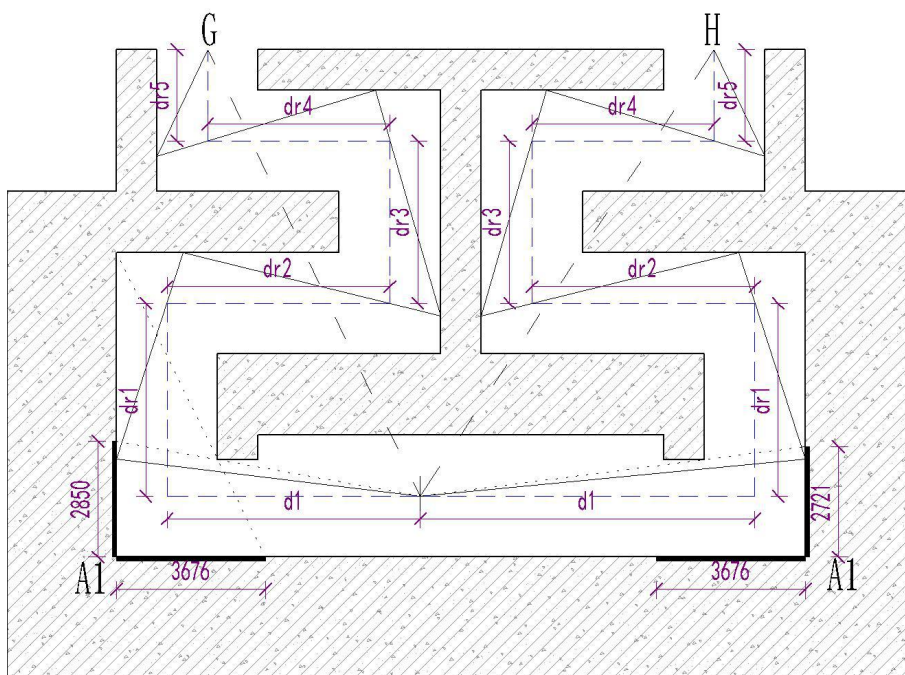


图 A. 5 辐照室散射路径示意图

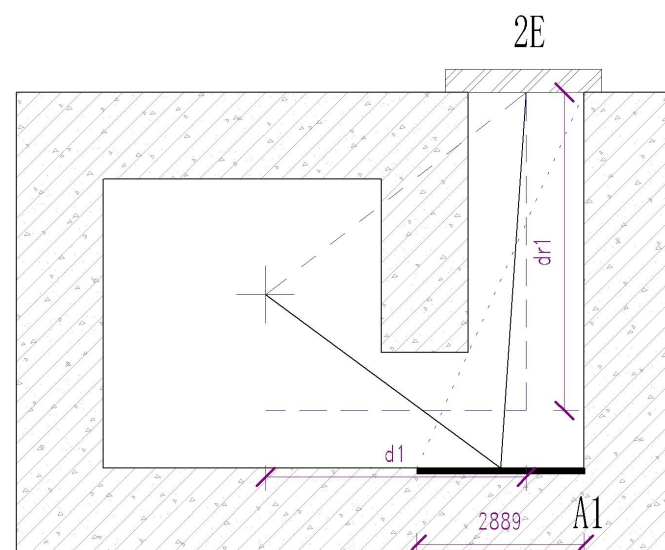


图 A. 6 主机室散射路径示意图

由表 A. 8 可知，辐照室迷道入口处周围剂量当量率为 $2.33 \times 10^{-4} \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ，远小于最大允许周围剂量当量率 $2.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ，所以，辐照室迷道的设计是合理的。主机室迷道入口处周围剂量当量率为 $1.45 \times 10^3 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ，远大于最大允许周围剂量当量率 $2.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ，所以，主机室必须增设防护门。

2.3 防护门的屏蔽计算

首先计算透射比 $B_x = H_M / H_0$ ，其中 H_M 为屏蔽门外侧最大允许周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)，取 2.5； H_0 为屏蔽门内侧吸收剂量率 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)。

$B_x=2.5/1.45\times10^3=1.72\times10^{-3}$ ， $n=\log_{10}(1/1.72\times10^{-3})=2.76$ 。为留出保守裕度， n 值取 3。
当 $n=3$ 时， $B_x=1.0\times10^{-3}$ 。

再由附录 A 表 A.2 和表 A.3 查出铅的 T_1 和 T_e 值：对于主机室当入射电子能量为 1.9MeV 时散射一次后 X 射线的能量为 0.5MeV，铅的 T_1 和 T_e 值分别为 $T_1=0.5\text{cm}$ ， $T_e=1.19\text{cm}$ 。

最后根据附录 A 公式（A-4）计算出对应铅防护门的厚度见表 A.9。

表 A.9 防护门的屏蔽厚度计算结果

H_0 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	H_M ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	B_x	n	铅防护门厚度 (cm)
1.45×10^3	2.5	1.0×10^{-3}	3	2.88

因此，当铅防护门的厚度为 2.88cm 时，屏蔽门外的剂量率为 $1.45\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ，满足小于 $2.5\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 的防护要求。

2.4 厂房屋顶厚度

屋顶厚度首先应考虑直射的防护，本计算设定加速器开机时主机室内及其屋顶上方均无人到达，因此，对屋顶直射的防护主要应考虑图 A.4 和图 A.7 从一层辐照室 X 射线源直射到二层主机室周围辅助房间的剂量。

表 A.10 一层辐照室屋顶厚度计算结果

楼层	参考点	位置	B_x	n	混凝土厚度 (m)	所需楼板厚度 (m)
二层 主机室 周围	2A	控制室	4.14×10^{-8}	7.38	2.62	1.55
	2B	办公室及会议室	9.88×10^{-8}	7.0	2.49	—
	2C	南墙外车道	5.55×10^{-8}	7.26	2.58	0.76
	2D	调制器室	5.2×10^{-8}	7.28	2.58	1.43

对于天空反散射，这里要综合考虑辐照室和主机室辐射对参照点 P 的剂量贡献，根据附录 A 公式（A-7）屋顶天空反散射计算结果见表 A.11。

假设 P 点位于公众所能达区域，区域居留因子取 1/4，因此 P 点所在位置的最大允许周围剂量当量率：

$$H_M=0.1\text{mSv}/(8760\text{h}\times1/4)=4.57\times10^{-2}\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$$

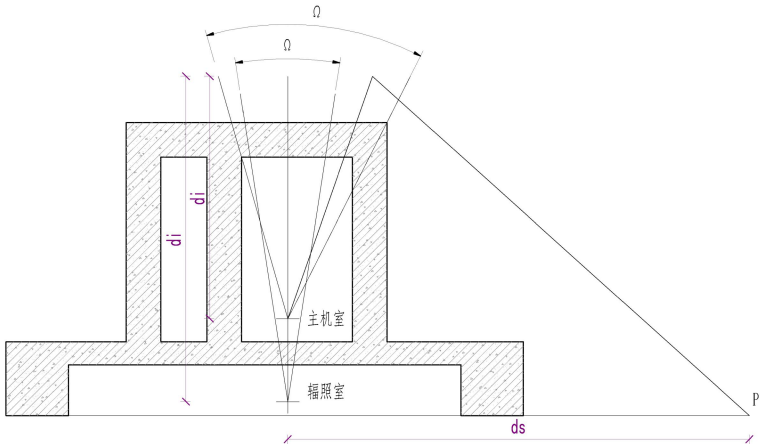


图 A.7 厂房屋顶厚度计算示意图

表 A.11 屋顶天空反散射计算结果

楼层	D_{10} ($\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)	H_M ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	Ω	d_i (m)	ds (m)	B_{xs}	所需屋顶厚度 (m)
一楼辐照室	1.62×10^3	4.57×10^{-2}	0.18	14.1	20	8.3×10^{-4}	1.09
二楼主机室	7.68	4.57×10^{-2}	0.20	10.5	20	8.5×10^{-2}	0.24

可见，天空反散射对 P 点的计量贡献主要来自辐照室。

因此，根据表 A.7、A.10 和 A.11 的计算结果，只要辐照室屋顶的厚度大于 1.55m，二楼辅助房间的剂量率即小于 $2.5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ，P 点的剂量率远小于 $4.57 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ，满足对应区域年剂量率要求，本示例一楼辐照室屋顶厚度保守取 1.7 米，二楼主机室屋顶厚度保守取 1.5m。

2.5 X 射线通过顶盖的侧向散射

当加速器近邻有高层建筑时，则 X 射线通过屋顶后侧向散射将成为对建筑物的主要贡献。

通过混凝土屋顶 X 射线的侧向散射采用附录公式 A-8 计算，二楼主机室屋顶的厚度 t 取值为 1.5m，本计算中假定角度 θ 为 40° 以及高层建筑距辐照室屏蔽体外侧的水平距离为 20m。X 射线的侧向散射计算结果见表 A.12。

表 A.12 X 射线的侧向散射计算结果

楼层	D_{10} ($\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)	F (m^2)	$f(\theta)$	d_R (m)	t (m)	T_1 (m)	T_e (m)	H ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
一楼辐照室	1.62×10^3	0.16	0.16	38.12	1.5	0.355	0.355	1.699
二楼主机室	7.68	24	0.16	38.12	1.5	0.221	0.201	8.79×10^{-4}

H 值大于公众的允许剂量水平，说明本示例在 20m 之内不允许有高层建筑；若建筑物高度或其距离不可改变，则应增加屋顶厚度。

附录 B 有害性气体的产生和排放计算

(资料性附录)

空气在辐射照射下产生臭氧 (O_3) 和氮氧化物 (NO_x) 等有害气体。氮氧化物的产额约为臭氧的三分之一, 且以臭氧的毒性最高, 所以主要是考虑臭氧的产生及其防护。

B.1 臭氧的产生

平行电子束所致 O_3 的产生率可以用以下公式进行保守的估算:

$$P=45dIG \quad (B-1)$$

式中:

P ——单位时间电子束产生 O_3 的质量 (mg/h);

I ——电子束流强度 (mA);

d ——电子在空气中的行程 (cm), 应结合电子在空气中的线阻止本领 $s=2.5keV/cm$ 和辐照室尺寸选取;

G ——空气吸收 100eV 辐射能量产生的 O_3 分子数, 保守值可取为 10。

B.2 辐照室臭氧的平衡浓度

在加速器正常运行期间, 臭氧不断产生, 考虑到室内连续通风和臭氧自身的化学分解(有效化学分解时间约为 50 分钟), 辐照室空气中臭氧的平衡浓度随辐照时间 t 的变化为:

$$C(t) = \frac{PT_e}{V} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_e}} \right) \quad (B-2)$$

式中:

$C(t)$ ——辐照室空气中在 t 时刻臭氧的浓度 (mg/m³);

P ——单位时间电子束产生 O_3 的质量 (mg/h);

T_e ——对臭氧的有效清除时间 (h)

$$T_e = \frac{T_V \times T_d}{T_V + T_d} \quad (B-3)$$

T_V ——辐照室换气一次所需时间 (h);

T_d ——臭氧的有效化学分解时间 (h), 约为 50 分钟。

此种情况下, $T_V \ll T_d$, 因而 $T_e \approx T_V$ 。当长时间辐照时, 则辐照室内臭氧平衡浓度为:

$$C_s = \frac{PT_e}{V} \quad (B-4)$$

B.3 臭氧的排放

加速器长期正常运行期间, 室内臭氧达到饱和平衡浓度, 通常情况下, 该浓度大大高于 GBZ2.1 所规定的工作场所最高容许浓度。因此, 当加速器停止运行后, 人员不能直接进入辐照室, 风机必须继续运行, 室内臭氧浓度随时间急剧下降, 浓度变化的平衡方程为:

$$dC/dt = -C/T_e \quad (B-5)$$

当 $t=0$ 时,

$$C=C_s \quad (B-6)$$

得到浓度随时间的变化公式为：

$$C = C_s e^{-\frac{t}{T_e}} \quad (\text{B-7})$$

由此可得：

关闭加速器后风机运行的持续时间公式为：

$$T = -T_e \ln \frac{C_0}{C_s} \quad (\text{B-8})$$

式中：

C_0 ——GBZ2.1 规定的臭氧的最高容许浓度， $C_0 = 0.3\text{mg/m}^3$ 。

T ——为使室内臭氧浓度低于规定的浓度所需时间（h）。

B.4 X 射线产生的臭氧

在辐射加工中，只有仅利用 X 射线的厂房，需要考虑 X 射线产生的臭氧。而电子束和 X 射线同时使用的厂房，只计算电子束产生臭氧就足够了。

如 X 射线在距靶 1 米处的周围剂量当量率为 D_{10} ，则 X 射线产生的臭氧可用下式估算：

$$P = 2 \times 10^{-9} D_{10} S L \quad (\text{B-9})$$

式中：

P ——臭氧的产生率（ $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ ）；

D_{10} ——X 射线在距靶 1 米处的周围剂量当量率（ $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ ）；

S ——受辐照区域的大小（ m^2 ）；

L ——X 射线在空气中路径长度（m）。