|  |  |
| --- | --- |
| ICS  | 27.120.99 |
| CCS  |

|  |
| --- |
| D:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T.pngD:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T后面的反斜杠.png CNS |

F 90 |

团体标准

T/CNS XXXX—XXXX

工业用自屏蔽电子加速器辐照装置辐射安全与防护

Radiation safety and protection of industrial self shielded electron accelerator irradiation equipment

     - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

中国核学会  发布

1. 前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国核学会提出。

本文件由核工业标准化研究所归口。

本标准主要起草单位：中广核达胜加速器技术有限公司、中国原子能科学研究院、江苏智研科技有限公司、生态环境部核与辐射安全中心、山东蓝孚高能物理技术股份有限公司、中广核辐照技术有限公司、苏州市生态环境局、苏州大学。

本文件主要起草人：。

1. 工业用自屏蔽电子加速器辐照装置辐射安全与防护
	1. 适用范围

本标准规定了工业用自屏蔽电子加速器(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、辐射工作场所划分、射线屏蔽要求、辐射安全设计、日常检修及记录等要求。

本标准适用于辐射加工用能量范围在0.5MeV~5MeV的工业用自屏蔽电子加速器辐照装置。

* 1. 规范性引用文件

本标准引用了下列文件或其中的条款。凡是注明日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是未注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GBZ 2.1 工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素

GBZ 2.2 工作场所有害因素职业接触限值 第 2 部分：物理因素

HJ 979-2018 电子加速器辐照装置辐射安全和防护

GB 3095 环境空气质量标准

GB 5172 粒子加速器辐射防护规定

GB/T 16841-2008 能量为300 keV~25 MeV电子束辐射加工装置剂量学导则

GB 18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

GB/T 20130-2006 自屏蔽电子束消毒灭菌装置

GB/T 25306-2010 辐射加工用电子加速器工程通用规范

GB/T 40590-2021 辐射加工用电子加速器装置运行维护管理通用规范

* 1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

运营单位 operator

有资格和能力承担电子加速器辐照装置运行的单位。

束流强度 electron beam intensity

通过参考面的束流的时间平均值，对于脉冲加速器是指平均束流强度。

自屏蔽电子加速器辐照装置 self-shielding electron accelerator irradiation device

由电子加速器、辐照室、传输系统、自屏蔽体、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。

自屏蔽 self-shielding

构成装置的屏蔽体,能将电子束打在辐照物或吸收体上产生的X射线的泄漏剂量在无需额外屏蔽的情况下减小到规定剂量限值以下。

加速器主机accelerator host

产生和加速电子束的装置。

辐照室 irradiation room

电子加速器发出射线形成辐射场，完成辐射加工工艺过程的空间结构。

* 1. 通用总则
		1. 工业用自屏蔽电子加速器由电子加速器装置、束下传输系统、安全联锁系统、屏蔽体等相关辅助 系统组成。
		2. 工业用自屏蔽电子加速器的屏蔽体应与加速器装置主体结构一体设计和制造。
		3. 工业用自屏蔽电子加速器应符合GB/T25306的要求，剂量率测量应符合GB/T16841-2008的要求，辐射安全与防护应参考HJ979-2018的要求。
		4. 工业用自屏蔽电子加速器应在其设计的技术参数和性能范围内运行。
		5. 运营单位应设有专门机构或专人负责工业用自屏蔽电子加速器管理。
		6. 运营单位应制定电子加速器辐照装置运行维护管理规程以及作业指导文件。
	2. 一般要求
		1. 辐射安全要求

安全原则

5.1.1.1 纵深防御

应对工业用自屏蔽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)，以确保当某一层次的防御措施失效时，可由下一层次的防御措施予以弥补或纠正，达到防止可能引起照射的事故或者减轻可能发生的任何类似事故的后果。

5.1.1.2 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。

5.1.1.3 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。

5.1.1.4 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。

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:

a) 控制区，如辐照室及产品出入口以内的区域;

b) 监督区，如设备操作区、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。

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 规定的电离辐射警告标志。

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说明。

* + 1. 辐射防护要求

辐射防护原则

5.2.1.1 辐射实践的正当性

工业用自屏蔽电子加速器辐照装置的建设立项，必须进行正当性分析，以确定其辐射实践的正当性。

5.2.1.2 辐射防护的最优化

工业用自屏蔽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。

5.2.1.3 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) 辐射工作人员年有效剂量为5mSv;

b) 公众成员年有效剂量为0.1mSv。

辐射屏蔽设计依据

工业用自屏蔽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。按照HJ979-2018要求，工业用自屏蔽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。监督区外为公众活动区域，屏蔽设计必须符合公众成员个人剂量约束值规定。

本标准适用的能量为0.5MeV~5MeV的电子束，在辐射屏蔽设计中不考虑所产生的中子防护问题。

* + 1. 辐射监测要求

5.3.1工业用自屏蔽电子加速器辐照装置注册者和许可证持有者应在合格专家和辐射防护负责人的配合下(必要时还应在用人单位的配合下)，制定、实施和定期复审工作场所辐射监测大纲，并按照方案计划落实各项监测工作。

5.3.2 所有辐射监测记录应建档保存，测量记录应包括测量对象、测量条件、测量方法、测量仪器及其编号、测量时间和测量人员等信息。

5.3.3应及时对辐射监测结果进行评价，监测中发现异常情况应及时调查原因并报告发证机关。

5.3.4应对辐射工作场所及周围辐射水平进行辐射监测，监测频次每年至少一次。移动式工业用自屏蔽电子加速器一般每年进行一次辐射水平监测，如更改作业场所时应开展辐射监测。

5.3.5辐照装置注册单位和许可证持有单位应对操作人员、维护检修人员、安装调试人员进行个人剂量监测，检测周期不超过三个月，并建立个人剂量档案，发现个人剂量异常应及时进行调查并上报发证机关。

5.3.6移动式工业用自屏蔽电子加速器在更换使用场地后应满足GB18871的剂量控制要求。

5.3.7工业用自屏蔽电子加速器辐照装置营运单位应配备并使用必要的辐射监测仪器及防护用品。

* 1. 辐射屏蔽要求
		1. 屏蔽设计原则

工业用自屏蔽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，还要满足在最大能量和最大束流强度组合下的屏蔽效果。

* + 1. 屏蔽设计计算

6.2.1屏蔽设计计算应充分分析电子束和（或）X射线的源项信息和发生率，结合设备基本组成、结构特征以及射线出射方向，根据人员位置应恰当选取参考点位，按照射线衰减规律和防护合理偏安全原则进行计算，以确保屏蔽体外的剂量水平符合GB18871的要求。

6.2.2辐射屏蔽设计可采用验证性计算方式，证明本辐射防护设计符合安全标准。

6.2.3屏蔽设计和计算结果应在设计文件中加以说明。

6.2.4工业用自屏蔽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，应参照附录A工业用自屏蔽电子加速器辐照装置的屏蔽计算方法计算。

* 1. 辐射安全设计

7.1 自屏蔽联锁要求

7.1.1在工业用自屏蔽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。

7.1.2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。

7.2 安全设施

7.2.1钥匙控制

工业用自屏蔽电子加速器的主控钥匙开关必须和加速器联锁。如从控制台/柜上取出该钥匙，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。

7.2.2门机联锁。

工业用自屏蔽电子加速器辐照装置上所有与辐射防护相关活动部件、通往加速器主机的控制区通道以及控制区入口处必须与束流控制和加速器高压联锁。工业用自屏蔽电子加速器辐照装置上所有与辐射防护相关活动部件必须与束流控制和加速器高压联锁，所有与辐射防护相关活动部件打开时,加速器不能开机，加速器运行中活动部件被打开则加速器应自动停机;

7.2.3束下装置联锁

工业用自屏蔽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。

7.2.4信号警示装置。

在工业用自屏蔽电子加速器辐照装置上应设置开机状态提醒灯光和音响警示信号，用于开机时对现场工作人员的警示。工业用自屏蔽电子加速器辐照装置控制区的人员出入口处应设置工作状态指示装置，并与工业用自屏蔽电子加速器辐照装置运行状态相关联。

7.2.5急停装置

在控制台\柜上和束下装置上设置紧急停机装置，使之能在紧急状态下终止加速器的运行。在紧急情况、事故处理完毕后，需将紧急停机开关复位后，工业用自屏蔽电子加速器辐照装置才能重新启动。

7.2.6剂量联锁。

在工业用自屏蔽电子加速器辐照装置屏蔽体外设置固定式辐射监测仪与控制台\柜联锁。当在运行时，辐照装置外辐射水平高于仪器设定的阀值时，工业用自屏蔽电子加速器辐照装置将会紧急停机。

7.2.7通风联锁。

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打开屏蔽体，以保证室内臭氧等有害气体浓度低于允许值。

7.2.8机械联锁。

辐照室开启闭合需要增设机械保护装置。

7.3 自屏蔽设计制造材料要求

对自屏蔽电子加速器的屏蔽材料通常可使用铅、钢、混凝土等材料，以及其他符合屏蔽防护并满足合理设计要求的材料。

7.4 其他要求

7.4.1电气系统

7.4.1.1 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；

7.4.1.2 各供电系统及相关设备应有可靠的接地系统；

7.4.1.3 凡有高压危险的部位，应设置高压联锁、高压放电保护装置。

7.4.2给水系统

7.4.2.1 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；

7.4.2.2 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。

7.4.3通风系统

7.4.3.1 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；

7.4.3.2 臭氧的产生和排放，其计算模式和参数见HJ979-2018附录 B；

7.4.3.3 辐照室内的主排气口应设置在易于排放臭氧的位置；

7.4.3.4 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。

7.4.4防火系统

工业用自屏蔽电子加速器辐照装置周边设置火灾报警装置和有效的灭火设施。

* 1. 日常检修及记录
		1. 维护与维修

工业用自屏蔽电子加速器辐照装置营运单位必须制定维护检修制度，定期巡视检查(检验) 每台加速器的主要设备，保持辐照装置主要设备的有效性和稳定性。涉及安全的设施设备变更，需经设计单位认可，并经监管部门同意后才能进行。

日检查

工业用自屏蔽电子加速器辐照装置上的常用安全设备应每天进行检查，发现异常情况时应及时报修。常规日检查项目至少包括:

a) 工作状态指示灯、报警灯；

b) 辐照装置安全联锁控制系统及显示状况；

c) 个人剂量报警仪和便携式辐射监测仪器工作状况。

月检查

工业用自屏蔽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，发现异常情况时应及时修复或改正。月检查项目至少包括:

a) 固定式辐射监测仪运行状况;

b) 控制台\柜及其他所有紧急停止按钮；

c) 通风系统的有效性;

d) 验证安全联锁功能的有效性。

半年检查

工业用自屏蔽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,发现异常情况时应及时采取整改措施。半年检查范围至少包括:

a) 配合年检修的检测；

b) 全部安全设备和控制系统的运行状况。

* + 1. 记录

辐照装置营运单位必须建立严格的运行及维护检修记录制度,运行及维护检修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:

a) 运行工况;

b) 发生的故障及排除方法;

c) 个人剂量计佩戴情况;

d) 个人剂量、工作场所和周边环境的辐射监测结果；

e) 检查及维修维护的内容与结果；

f) 其它。

1.
2. 工业用自屏蔽电子加速器屏蔽防护计算

(资料性附录)

自屏蔽结构加速器以HJ979-2018为参考进行辐射影响分析。结合加速器屏蔽体特征和设备运行场景设定关注点，从保守角度出发，在屏蔽体设计的尺寸厚度基础上，假定工业电子加速器最大功率运行情况进行辐射水平预测计算。

电子加速器出束辐照时，辐照室内电子束可能轰击的物质主要有2种：

①待辐照物品；

②电子扫描窗下方的不锈钢阻挡板。

不同能量电子束轰击不同物料时，其韧致辐射（X射线）发射率不同。对同一种靶材料，不同方向上韧致辐射的发射率也不相同。依据辐射与物质相互作用理论，辐照室内电子束轰击不锈钢时，X射线发射率最高，因此保守选取不锈钢为韧致辐射产生靶，进行辐射防护评价。

* 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Q (单位：Gy·m2·mA-1·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 |
| 前向0° | 0.008 | 0.26 | 1.3 | 3.3 | 7.0 | 14.0 | 30.0 | 63.2 |
| 侧向90° | 0.07 | 0.4 | 1.0 | 1.6 | 2.5 | 3.2 | 4.8 | 6.5 |

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射线的透射比Bx,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。

* 1. 0°方向X射线的屏蔽

直射X射线剂量率根据HJ979-2018公式A-1可得：

 HM=$\frac{D\_{10}∙B\_{X}∙T}{1×10^{−6}∙d^{2}}$ (A-1)

式中：*HM*—参考点周围剂量当量率（µSv∙h-1）；

*Bx*—X射线屏蔽透射比；

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

*d*—X射线源与参考点之间的距离（m）；

常数（1×10-6）为单位转换系数。

D10—距离X射线辐射源1m处的标准参考点的吸收剂量率（Gy∙h-1）；

 $D\_{10}=60∙Q∙I∙f\_{e}$ (A-2)

式中：Q—X射线发射率（Gy·m2·mA-1·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。

在已知屏蔽体屏蔽条件情况下，*Bx*根据HJ979-2018中公式A-3、公式A-4可得：

 $B\_{X}=10^{−n}$ (A-3)

$n=\frac{s−T\_{1}+T\_{e}}{T\_{e}}$ (A-4)

式中：S—屏蔽体厚度（cm）；

T1—在屏蔽厚度中，朝向辐射源的第一个十分之一值层（cm）；

Te—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、钢板、钢砂和铅的 T1和 Te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 |
| 混凝土 | 15.2 | 18.5 | 20.4 | 22.1 | 24.2 | 26.1 | 30.5 | 32.5 |
| 钢 | 3.8 | 5.5 | 6.8 | 7.7 | 8.3 | 8.7 | 9.2 | 9.7 |
| 铅 | 0.5 | 1.5 | 2.6 | 3.35 | 4.7 | 4.5 | 5.0 | 5.3 |

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 |
| 混凝土 | 11.9 | 15.0 | 18.3 | 20.1 | 22.5 | 24.7 | 30.5 | 32.5 |
| 钢 | 3.3 | 5.0 | 6.2 | 7.0 | 7.7 | 8.2 | 9.2 | 9.7 |
| 铅 | 1.2 | 2.6 | 3.65 | 4.2 | 4.1 | 4.9 | 5.3 | 5.5 |

* 1. 90°方向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 |
| 等效入射电子能量 | 0.7 | 1.0 | 1.3 | 1.6 | 1.9 | 2.5 | 3.1 |

* 1. 迷道外入口的剂量率估算

防护X射线的迷道，按照公式（A-5）可保守地估算迷道外入口的剂量率：

$H\_{1,rj}=\frac{D\_{10}α\_{1}A\_{1}(α\_{2}A\_{2})^{j−1}}{(d\_{1}∙d\_{r1}∙d\_{r2}\cdots d\_{rj})^{2}}$ (A-5)

式中：H1，rj—迷道出口处的空气吸收剂量率，µSv/h；

*α1*—入射到第一个散射体的X射线的散射系数，参考HJ979-2018取0.005；

*α2*—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

所有散射过程的相同的），参考HJ979-2018取0.02；

*A1*—X射线入射到第一散射物质的散射面积，m2；

*A2*—迷道的截面积，m2；

*d1*—X射线源与第一散射物质的距离，m；

*dr1，dr2…drj*—沿着迷道长轴的中心线距离；

*j*—第*j*个散射过程。

1. 示例1.0MeV工业用自屏蔽电子加速器屏蔽防护计算
(资料性附录)
	1. 工程概况

本示例所进行屏蔽计算的工业用电子加速器采用自屏蔽结构，束流方向垂直地面向下是应用于辐照电线电缆方面的一种典型自屏蔽结构装置，屏蔽体整体利用钢板加工而成，在接缝处均采用阶梯状嵌合使得射线无法从缝隙处直射，有效避免了辐射在接缝处的泄露。

* 1. 基本参数

工业用自屏蔽电子加速器能量为1.0MeV，束流为80mA， 束流功率为80KW。辐照室内净空尺寸为长3.4m×宽2.1m×高1.5m，扫描室内净空尺寸为长2.1m×宽1.5m×高1.4m，该设备的屏蔽体采用自屏蔽结构，加速器中侧钢桶使用铅板、钢板作为屏蔽体，防护最薄弱处为65mm钢板，其余屏蔽体厚度参数如表B.1所示。

表B.1 1.0MeV/80mA自屏蔽电子加速器屏蔽参数表

|  |  |
| --- | --- |
| 屏蔽位置 | 屏蔽参数 |
| 辐照室右面 | 380mm铁板 |
| 辐照室左面 | 380mm铁板 |
| 辐照室前面 | 380mm铁板 |
| 辐照室后面 | 380mm铁板 |
| 扫描窗室右面 | 420mm铁板 |
| 扫描窗室左面 | 380 mm铁板 |
| 扫描窗室前面 | 380 mm铁板 |
| 扫描窗室后面 | 380 mm铁板 |
| 设备平台 | 400mm铁板 |

* 1. 计算参数选取

本示例由于束流方式垂直向下，底部是地面人员无法到达，因此在进行屏蔽防护验证计算时不考虑0°方向的X射线屏蔽，只考虑90°方向和180°方向的X射线屏蔽。参考附录A中的表A.4可知1MeV的90°等效入射电子能量为0.7MeV，参考表A.1 90°X射线发射率常数Q为0.4 Gy·m2·mA-1·min-1，由于被辐照的靶材料是铁，因此在90°方向选取的修正因子*f*e为0.5，根据附录A公式（A-2）可得90°方向的距离X射线辐射源1m处的标准参考点的吸收剂量率为：

D10(90°)=60×0.5×80×0.4=960Gy/h

同时根据附录A中的表A.2和表A.3可知在侧向等效入射电子能量为0.7MeV条件下铁的第一个十分之一值层厚度和平衡十分之一值层厚度分别为4.48cm和3.98cm，该参数可利用表A.2、表A.3的数据以内插法获取。综上所述本次计算相关参数如表B.2所列。

表B.2 1.0MeV/80mA型工业用自屏蔽电子加速器屏蔽计算参数表

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 数据 |
| 入射电子能量 | 1.0MeV |
| 侧向等效入射电子能量 | 0.7MeV |
| 电子束流强度 | 80mA |
| 侧向90°X射线发射率常数Q（Gy·m2·mA-1·min-1） | 0.4 |
| 修正因子*fe* | 0.5 |
| *D10*（Gy/h） | 960 |
| 铁*T1*，*Te*（cm） | 4.48，3.98 |

* 1. 加速器辐照室屏蔽体屏蔽效果计算

在进行屏蔽计算之前需选取相关的关注点，关注点的选取应充分分析电子束和（或）X射线的源项信息和发生率，并结合设备基本组成、结构特征以及射线出射方向以及根据人员位置来恰当选取参考点位，在本示例中拟在加速器屏蔽体表面5cm处取参考点如图B.1所示，并利用附录A公式对加速器屏蔽体外辐射剂量率进行保守预测计算。

以A点计算为例，首先计算对于关注点A的透射比*Bx*,根据公式(A-3)和(A-4)可知n=(38-4.48+3.98)/3.98=9.42，为保守计算最终n取9，因此对于关注点A的投射比*Bx*=1.0×10-9，再利用公式（A-1）将表B.2中的相关数据带入计算可得关注点A周围剂量当量率为：

$$H\_{M}=\frac{D\_{10}∙B\_{X}∙T}{1×10^{−6}∙d^{2}}=\frac{960×1.0×10^{−9}×1}{1×10^{−6}×(2.05×2.05)}=0.228μSv﹒ℎ^{−1}$$

同理对于其余各个关注点的计算方式也是一致，相关计算结果见表B.3。

表B.3 1.0MeV/80mA型工业自屏蔽电子加速器屏蔽计算一览表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 参考点 | 位置 | *D10*(Gy/h) | 铁屏蔽材料厚度S（cm） | *BX* | *d(m)➀* | T➁ | 剂量率*HM*(μSv/h) |
| A | 辐照室右面 | 960 | 38 | 1.0E-09 | 2.05 | 1 | 0.228 |
| B | 辐照室左面 | 960 | 38 | 1.0E-09 | 2.20 | 1 | 0.198 |
| C | 辐照室前面 | 960 | 38 | 1.0E-09 | 1.55 | 1 | 0.399 |
| D | 辐照室后面 | 960 | 38 | 1.0E-09 | 1.60 | 1 | 0.375 |
| E | 扫描窗室右面 | 960 | 42 | 1.0E-10 | 2.04 | 1 | 0.023 |
| F | 扫描窗室左面 | 960 | 38 | 1.0E-09 | 2.06 | 1 | 0.226 |
| G | 扫描窗室前面 | 960 | 38 | 1.0E-09 | 2.22 | 1 | 0.195 |
| H | 扫描窗室后面 | 960 | 38 | 1.0E-09 | 2.22 | 1 | 0.195 |
| I | 设备平台 | 960 | 40 | 1.0E-09 | 2.57 | 1 | 0.145 |

注：➀、\*屏蔽厚度S与距离d均直接由CAD图纸上读取。

➁、保守计算考虑将居留因子全部取1；

 

图B1 1.0MeV/80mA型工业自屏蔽电子加速器屏蔽计算参考点位示意图

* 1. 束流加速系统钢桶屏蔽分析

对于加速器主体束流加速系统内的束流损失，根据上述工程概况提供资料，当加速管内真空度良好的时候，可以忽略不计，即使在不利工况下，束流损失仅为1%，束流损失能量为10%，其产生的X射线能量较低。对于电子主束为1.0MeV的加速器，束流损失能量约为0.1MeV，1.0MeV/80mA型工业自屏蔽电子加速器侧钢桶使用铅板、钢板作为屏蔽体，防护最薄弱处为65mm钢板，其对能量为0.1MeV的入射电子所致X射线的衰减因子可达10-10量级，因此束流损失受到加速器侧钢桶的进一步屏蔽后对钢桶外的辐射影响很小。

* 1. 180°方向辐射影响分析

本示例中的加速器从辐照室X射线源直射到辐照室顶面（参考点I）的剂量不超过0.145μSv/h，天空反散射的影响远小于X射线源直射到辐照室顶部的影响，故本项目天空反散射所致辐射剂量率将远小于0.145μSv/h。

* 1. 辐照室线缆管道、排风/进风管道辐射影响分析

1.0MeV/80mA型工业电子加速器主要应用于电线电缆等材料的辐照改性，辐照室线缆管道、臭氧排风管道及冷却进风管道均设计为斜向穿墙管道，穿墙孔洞均避开有用线束方向，且不破坏墙体的整体屏蔽效果。该穿墙管道的设计使得在任何情况下辐照室内的电子束或X射线均无法直接从管道口直射出屏蔽体，而是在管道内多次散射。管道口的设计管径较小均避开主射线方向，且射线需经多次散射后才能到达管道出口，同时各个关注点的剂量均小于2.5μSv/h，因此在本示例中不需进行迷道散射计算。

综合以上计算、分析可知，1.0MeV/80mA型工业自屏蔽电子加速器屏蔽设计能满足参考标准《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ979-2018）中“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”的要求。

参考文献

[1]薛颖.自屏蔽电子加速器的辐照室屏蔽设计[J].中国资源综合利用,2021,39(02):62-64.

[2]伦亚楠,赵鸣谦,东双.高频高压型电子加速器辐射环境影响分析[J].资源节约与环保,2021,(08):142-143+146.DOI:10.16317/j.cnki.12-1377/x.2021.08.070.

[3]熊川宝,杨悦.某工业辐照用自屏蔽电子加速器辐射防护效果分析[J].中国工业医学杂志,2023,36(01):61-63.DOI:10.13631/j.cnki.zggyyx.2023.01.022.