

工业CT防辐射专业屏蔽实验室建设

刘 东^{1,2}, 曹进爱^{1,2}, 刘 宁^{1,2}, 付 彬^{1,2}, 李雪梅^{1,2}

¹潍柴动力股份有限公司质量部, 山东 潍坊

²国家内燃机产业计量测试中心质量部, 山东 潍坊

收稿日期: 2026年7月28日; 录用日期: 2026年8月21日; 发布日期: 2026年8月28日

摘 要

工业CT是工业无损探伤检测的必备仪器设备, 但使用这类仪器的实验室建造如果处理不当将对周围环境造成辐射污染。依据现行国家标准, 工作场所以及周边环境的屏蔽体(墙)表面大于或等于30 cm处任何监测点的周围X射线剂量当量率应不大于2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 。为满足标准要求, 在实验室建造过程中, 提出了复合式结构, 并增加多种防辐射泄露等处理措施, 建成后测试表明辐射泄露率降低至1.0 $\mu\text{Sv/h}$ 以内。

关键词

工业CT, X射线, 辐射泄露率, 实验室

Construction of Industrial CT Radiation Protection Laboratory

Dong Liu^{1,2}, Jin'ai Cao^{1,2}, Ning Liu^{1,2}, Bin Fu^{1,2}, Xuemei Li^{1,2}

¹Quality Department, Weichai Power Co., Ltd., Weifang Shandong

²Quality Department, National Internal Combustion Engine Industry Measurement and Testing Center, Weifang Shandong

Received: July 28, 2026; accepted: August 21, 2026; published: August 28, 2026

Abstract

Industrial CT is an essential piece of equipment for non-destructive testing in industry, but if the labs using this kind of equipment aren't set up properly, they can cause radiation pollution to the surrounding environment. According to current national standards, the equivalent dose rate of X-rays at any monitoring point at or beyond 30 cm from the shielding walls of the workplace and surrounding area shouldn't exceed 2.5 $\mu\text{Sv/h}$. To meet these standards, during the lab construction, a composite structure was proposed, along with various measures to prevent radiation leakage. After construction, tests showed that the radiation leakage was reduced to below 1.0 $\mu\text{Sv/h}$.

文章引用: 刘东, 曹进爱, 刘宁, 付彬, 李雪梅. 工业CT防辐射专业屏蔽实验室建设[J]. 机械工程技术, 2026, 15(4): 498-509. DOI: 10.12677/met.2026.154047

Keywords

Industrial CT, X-Ray, Radiation Leakage Rate, Laboratory

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着高端装备制造产业快速升级,大中型发动机铸件、精密壳体类零部件对内部缺陷检测精度的要求持续提升,工业 CT 无损检测技术凭借高精度、可视化、无损伤的检测优势,已成为高端零部件质量把控、失效分析、工艺优化的核心技术手段。

高能电子直线加速器工业 CT 可实现厚重金属构件的深层透视检测,能够精准识别构件内部气孔、缩松、裂纹、夹杂等微小缺陷,广泛应用于汽车动力、高端装备、精密制造等关键领域。但高能加速器设备运行过程中会产生高强度 X 射线及次级中子辐射,国标要求工业射线装置墙外公众区域剂量当量不超过 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ [1],若实验室屏蔽防护结构设计不合理、防护措施不到位,极易造成辐射外泄,对操作人员身体健康及周边作业环境形成安全隐患[2]。依据国家辐射防护相关规范,工业射线装置作业场所必须配备完善的屏蔽结构、安全联锁及应急防护体系,严格控制环境辐射剂量水平[3] [4]。

为此,针对 9 MeV 高能加速器工业 CT 设备的辐射特性,设计并搭建复合式辐射防护实验室,通过优化屏蔽结构、精准约束射线范围、完善安全管控体系,有效降低辐射泄露风险,在满足高端零部件高精度无损检测需求的同时,全面保障实验室运行安全与人员职业健康[5]。

2. 工业 CT 防辐射实验室建造背景

电子直线加速器工业 CT 是通过微波电磁场将电子束沿直线轨道加速到更高能量,电子经过加速后,受到金属靶的阻止而产生韧致辐射 X 射线,由于 X 射线的贯穿能力极强,对周围环境可能造成辐射污染,但运行时产生的 X 射线随加速器的开、关而产生和消失。为满足发动机缸体、缸盖、蜗壳、变速箱壳体等大中型铸件和零部件的三维无损检测分析,实现零部件内部看的见、看得清的目标,需要更高的工业 CT 射线辐射能量,势必会带来射线防护方面的问题。以 9 MeV 加速器工业 CT 为例,加速器工业 CT 不仅产生高能射线,而且会产生附属的中子束,因此需要对高能 X 射线和中子束都进行屏蔽,防止对周围环境和操作人员造成辐射伤害[5]。

3. 创新点与技术优势

本实验室建造具备多项创新点与核心优势,区别于传统工业 CT 屏蔽实验室建造方案。

(1) **复合式防护结构:** 采用高强度混凝土预制构件、铅构件、低密度砂和混凝土屏蔽块复合构建了 9 MeV 加速器 CT 辐射防护屏蔽室,每种材料都有特定的辐射防护重点。与传统的混凝土浇灌屏蔽室只是单纯靠混凝土厚度屏蔽辐射相比,采用复合式屏蔽室的各种材料可以更精准防护特定的辐射种类,最大化材料的利用率[6]。

(2) **精准屏蔽:** 通过 9 MeV 加速器迷你铅房和准直器的有效约束,将加速器的射线束约束到特定的方向和范围内,然后对该方向和范围进行精准屏蔽防护[7]。

(3) **结构紧凑,占地面积小:** 传统屏蔽室的墙体厚度需要不小于 2.5 米,而本项目的主照射面墙体厚

度 2 米，非主照射面的墙体厚度 1.6 米，占地面积更小。

(4) **施工快捷，无“三废”**：屏蔽室所用的所有材料和构件均为工厂预制，无需现场裁切、喷漆、排水、混凝土养护等过程，所以施工更简单快捷，更环保。

4. 整体设计思路与实现方案

基于复合式构建屏蔽室的思想，根据加速器辐射的分布规律，计算分析具体的防护方案和措施。

4.1. 设计原理

4.1.1. 计算模型与依据

采用 IAEA Safety Report Series No.47 工业高能射线屏蔽经验公式[8]作为基础计算模型，引入 MCNP6.2 蒙特卡洛粒子输运程序修正散射叠加效应与光中子耦合贡献。设计控制指标为屏蔽体外 30 cm 处辐射剂量当量率 $H \leq 1.0 \mu\text{Sv/h}$ ，严于 GB 18871 规定的 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 限值。辐射源分为 9 MeV 韧致 X 射线(主辐射)与光中子(次级辐射)，两类辐射分别计算屏蔽厚度后复合校核。

4.1.2. 9 MeV 加速器源项基础参数

1. 韧致 X 射线源项

加速电子能量 9 MeV，靶材为金属钨，主射束初始空气比释动能率 $K_0 = 1250 \text{ Gy}\cdot\text{m}^2/\text{h}$ ，室内单次散射衰减因子 $S = 0.025$ ，经迷你铅房与双轴准直器约束后束流立体角 $\Omega = 0.122 \text{ sr}$ 。高能 X 射线辐射权重因子 $w_R = 1$ ，剂量换算关系： $1 \times 10^{-8} \text{ Gy/h} = 0.1 \mu\text{Sv/h}$ 。

2. 光中子源项

9 MeV 钨靶光中子产额 $Y_n = 1.2 \times 10^9 \text{ n}/(\text{mA}\cdot\text{S})$ ，中子能量区间(0.1~2) MeV 快中子；屏蔽逻辑：混凝土慢化快中子，低密度硼基屏蔽砂吸收热中子，铅材料对中子无屏蔽能力，仅用于衰减 X 射线。

4.1.3. 辐射衰减基础计算公式

1. 窄束指数衰减模型

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

式中： I_0 为入射辐射强度； μ 为材料线性衰减系数； x 为屏蔽材料厚度； $I(x)$ 为穿透屏蔽后的辐射强度。

2. 半值层与衰减系数换算

$$M = \frac{\ln 2}{\text{HVL}}$$

式中 HVL 为材料半值层厚度。

3. 环境剂量约束方程

$$H_0 \cdot \Omega \cdot S \cdot e^{-(\mu_{\text{pb}} x_{\text{pb}} + \mu_{\text{con}} x_{\text{con}} + \mu_{\text{sand}} x_{\text{sand}})} \leq H_{\text{limit}}$$

式中 $H_{\text{limit}} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ Sv/h}$ 为设计控制限值。

4.1.4. 分方位屏蔽厚度分步计算

东向主照射面(直射 X 射线 + 强中子场)查阅 10 MV 能级半值层数据，混凝土 $\text{HVL} = 117 \text{ mm}$ ，铅 $\text{HVL} = 23 \text{ mm}$ 。通过衰减方程计算确定 400 mm 铅板衰减主高能 X 射线，2200 mm 高强度混凝土衰减剩余散射线；混凝土将快中子慢化为热中子，夹层 150 mm 硼基屏蔽砂吸收热中子。MCNP 模拟显示中子穿透剂量当量 $\leq 0.08 \mu\text{Sv/h}$ 。复合结构：2200 mm 高强度混凝土 + 400 mm 铅板 + 150 mm 中子屏蔽砂夹层。

南北侧向散射线面(散射 X 射线 + 弱中子场)侧向无直射主束，散射 X 射线强度为主束 1/40，中子

产额为主向 1/15。计算得到 1600 mm 混凝土搭配 100~150 mm 铅板可满足衰减要求，混凝土慢化中子后夹层填充 100 mm 屏蔽砂，穿透剂量当量 $\leq 0.6 \mu\text{Sv/h}$ 。南墙：1600 mm 混凝土 + 100 mm 铅板；北墙：1600 mm 混凝土 + 150 mm 铅板。

西侧工件出入口防护面门洞造成辐射泄漏风险提升，基底采用 2200 mm 混凝土 + 150 mm 铅板，配套 250 mmPb 电动平移铅防护门，门体与墙体搭接宽度 20 cm，消除缝隙漏射。

顶棚防护(向上散射辐射)无直射高能主束，散射辐射水平较低，采用 1000 mm 混凝土 + 200 mm 铅板复合结构，MCNP 模拟楼顶外侧 30 cm 处剂量当量 $\leq 0.5 \mu\text{Sv/h}$ 。

4.1.5. 加速器源项辐射分布测量

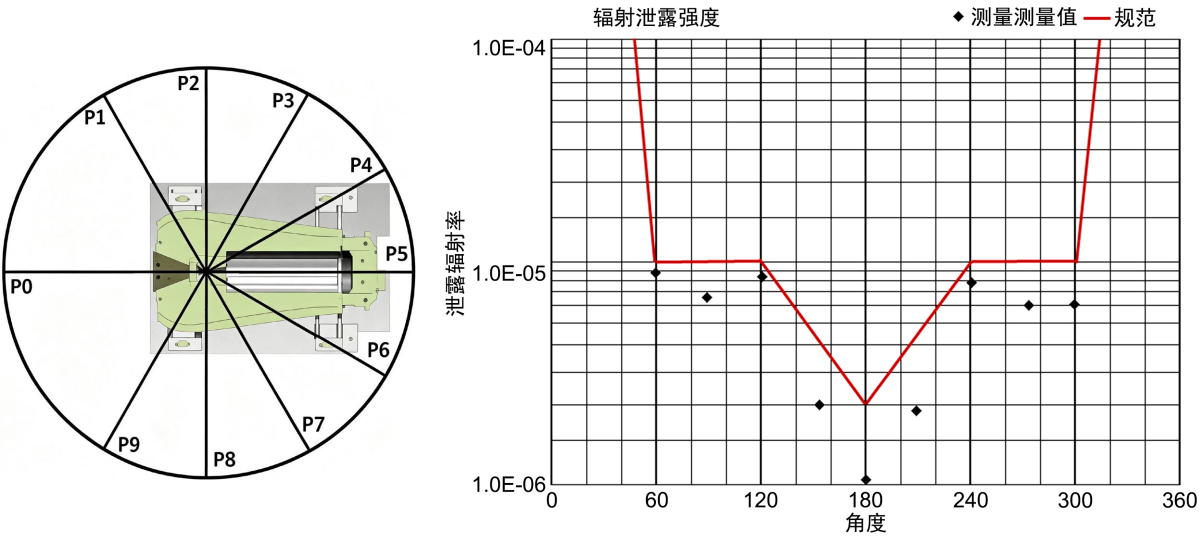


Figure 1. X-ray generation and dose rate distribution at different positions (top view)
图 1. X 射线发生及不同位置泄露剂量率分布图(俯视)

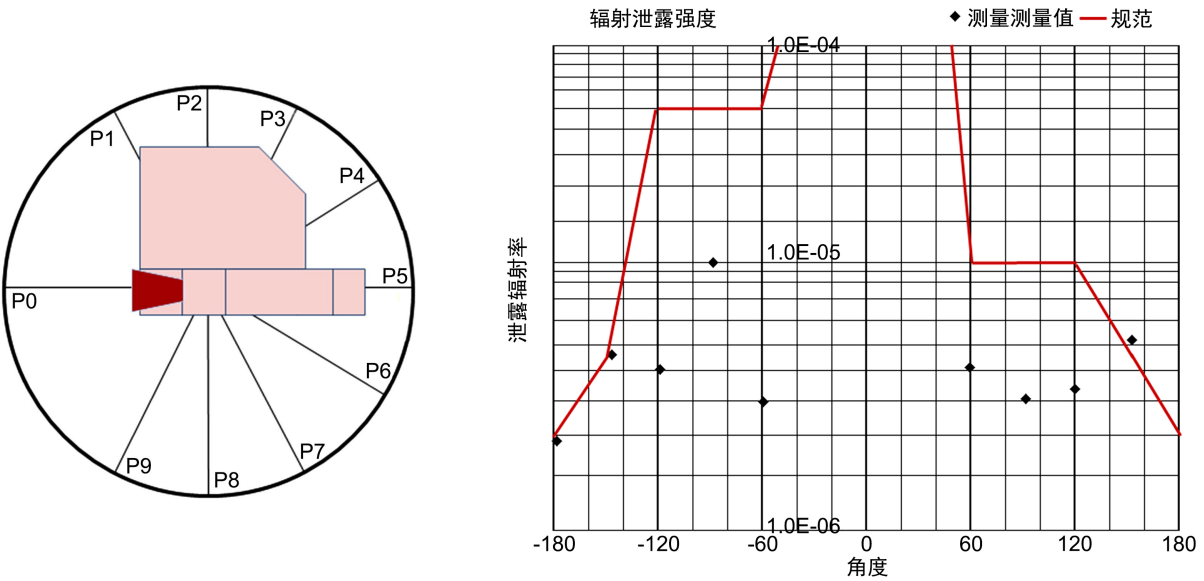


Figure 2. X-ray generation and dose rate distribution of leaks at different positions (side view)
图 2. X 射线发生及不同位置泄露剂量率分布图(侧向)

根据加速器厂商给出的泄露率测试报告，采用剂量计测量加速器源如下位置的实际辐射泄露率，获得加速器源的辐射泄露率分布图，如图 1，图 2 所示。CT 扫描只需要射线束主照射方向 $\pm 20^\circ$ 范围内的射线，其余射线均可以被直接屏蔽掉，所以采用加速器源迷你铅房把射线束约束到水平方向 $\pm 20^\circ$ 范围内，然后通过电动准直器把射线束约束到竖直方向 $\pm 20^\circ$ 范围内，进而实现把射线束约束到 $\pm 20^\circ$ 范围内的目标[9]。

4.2. 主要放射性污染物和污染途径

实验室运行过程中会产生各类放射性及非放射性污染，明确污染物类型与污染途径是防护设计的核心基础。

- (1) **高能 X 射线污染:**9 MeV 电子加速器电子枪产生的高能电子撞击金属靶后产生韧致辐射 X 射线，该类射线贯穿性极强，易造成周边辐射污染，且射线产生与消失随加速器启停同步。
- (2) **非放射性有害气体污染:**加速器开机运行时，电子束电离检测房内空气，会产生臭氧(O_3)和以二氧化氮(NO_2)为主的氮氧化物(NOX)，两类气体均具有刺激性，会影响室内空气质量[10]。
- (3) **放射性废水:**加速器配套冷却水循环系统的水体易发生活化产生放射性，本项目 9 MeV 加速器产生的活化物量较少，冷却水中主要放射性核素为 ^{15}O 、 ^{16}N ，半衰期分别为 2.1 min 和 7.3 s，短半衰期特性使其活度可通过静置快速衰减。项目采用内循环去离子水作为一次冷却水，全程不外排，系统缺水时自动报警，工作人员及时补水即可保障系统稳定运行。
- (4) **非放射性固体废物:**加速器退役后产生的废靶统一由供货商回收处置，无固废污染遗留问题。

4.3. 设计过程

4.3.1. X 射线的防护机理

X 射线是一种波长极短、能量高、穿透力强的电磁波。辐射频率是所有光子的关键参数，因为它决定了光子的能量。光子根据能量分类，从低能无线电波和红外辐射到可见光，再到高能 X 射线和伽马射线[11]。

半值层表示将入射辐射强度降低两倍所需的吸收材料的厚度，半值层衰减示意图和对应厚度值见图 3 和表 1。半值层有两个主要特点：

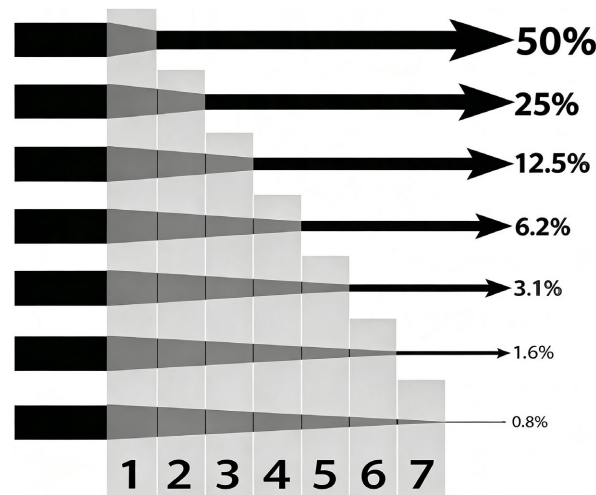


Figure 3. Schematic of half-value layer attenuation
图 3. 半值层衰减示意图

Table 1. Half-value layer thickness**表 1.** 半值层厚度表

衰减材料	100 keV	200 keV	500 keV
空气	3555 cm	4359 cm	6189 cm
水	4.15 cm	5.1 cm	7.15 cm
碳	2.07 cm	2.53 cm	3.54 cm
铝	1.59 cm	2.14 cm	3.05 cm
钢	0.26 cm	0.64 cm	1.06 cm
铜	0.18 cm	0.53 cm	0.95 cm
铅	0.012 cm	0.068 cm	0.42 cm

a) 半值层随着吸收体原子序数的增加而减少。例如，需要 35 m 的空气才能将 100 keV X 射线束的强度降低两倍，而只需 0.12 mm 的铅就可以做到这一点。

b) 所有材料的半值层都随着 X 射线的能量而增加。例如，从 100 keV 的铁的 0.26 cm 到 200 keV 的大约 0.64 cm。

如果要将 100 keV 单能 X 射线束(窄束)的强度降低到其入射强度的 1%，如果屏蔽材料为水，100 keV X 射线在水中的半值层为 4.15 cm，100 keV X 射线在水中的线性衰减系数为 0.167 cm^{-1} 。计算过程可以用以下等式来描述：

$$I(x) = \frac{I_0}{100}$$

如果水的半值层为 4.15 cm，则线性衰减系数为：

$$\mu = \frac{\ln 2}{4.15} = 0.167 \text{ cm}^{-1}$$

进一步使用指数衰减方程：

$$I(x) = \frac{I_0}{100} = I_0 \exp(-\mu x)$$

$$\frac{I_0}{100} = I_0 \exp(-0.167x)$$

$$\ln \frac{1}{100} = -0.167x$$

$$x = \frac{\ln 100}{0.167} = 27.58 \text{ cm}$$

所以所需的水厚度约为 27.58 厘米。这是相对较大的厚度，它是由氢和氧的小原子序数引起的。如果我们计算铅(Pb)的相同衰减量，我们得到铅的厚度 $x = 0.077 \text{ cm}$ 。

同理，根据 9 MeV 加速器源的辐射分布情况，结合混凝土、铅、低密度砂等材料的半值层厚度，可以计算各个方向所需要的屏蔽材料厚度[8] [9]，见表 2。

Table 2. Half-value layer thickness of high-energy rays
表 2. 高能射线半值层厚度表

源	半值层厚度值		
	铅板厚度(mm)	混凝土厚度	
		(mm)	in
50 kVp	0.07	8.8	0.15
50 kVcp	0.06	8.0	0.12
70 kVp	0.10	10.2	0.4
75 kVp	0.17	11.5	0.45
75 kVcp	0.19	12.0	0.47
100 kVp	0.26	16.5	0.65
100 kVcp	0.30	17.0	0.67
125 kVp	0.29	19.1	0.75
150 kVp	0.32	21.8	0.85
150 kVcp	0.32	22.0	0.87
200 kVp	0.43	25.9	1.02
200 kVcp	0.43	26.0	1.02
250 kVp	0.90	27.7	1.09
250 kVcp	0.98	28.0	1.1
300 kVp	1.48	30.2	1.2
300 kVcp	1.33	28.7	1.13
400 kVcp	2.47	29.7	1.17
0.5 MV	7.60	35.6	1.4
1.0 MV	11.50	45.7	1.8
2.0 MV	12.00	61	2.4
3.0 MV	12.40	68.6	2.7
4.0 MV	14.80	83.8	3.3
6.0 MV	19.80	102	4
10 MV	23.00	117	4.6

4.3.2. 结构设计方案

实验室所有入口防护门与工业 CT 设备实现电气联锁，防护门开启状态下加速器无法加高压出束，若设备出束时防护门被开启，加速器将自动切断高压停机，需控制台复位后方可重新启动；检测室人员入口设置迷道，有用线束朝向避开工件出入口、控制室和迷道区域，迷道防护门内侧设置醒目紧急开门

开关,保障突发情况下人员快速撤离。检测室、迷道、加速器机头及设备操作台均布设紧急停机按钮,墙面、迷道内配套设置复位按钮,所有操作开关均标注明显标识,设备紧急停机后必须完成复位方可重启,从控制逻辑上规避安全风险[12]。

检测室配套专用通风装置,保障室内外空气质量符合 GB 3095 标准要求[9],同时布设固定式剂量监测装置,实时监测加速器出束状态,室内安装全覆盖监控设备,重点覆盖加速器有用线束区域,控制室配套专用监视器,检测室与控制室之间增设通讯设备,保障人机交互与远程监控全覆盖。整体屏蔽结构采用差异化复合防护方案,主照射方向依托高强度混凝土预制构件、铅构件、低密度砂和混凝土屏蔽块复合屏蔽主射束与中子束,其余方向通过预制构件、低密度砂和混凝土屏蔽块屏蔽散射线与散射中子束,实现分级、精准防护,如图 4 所示。

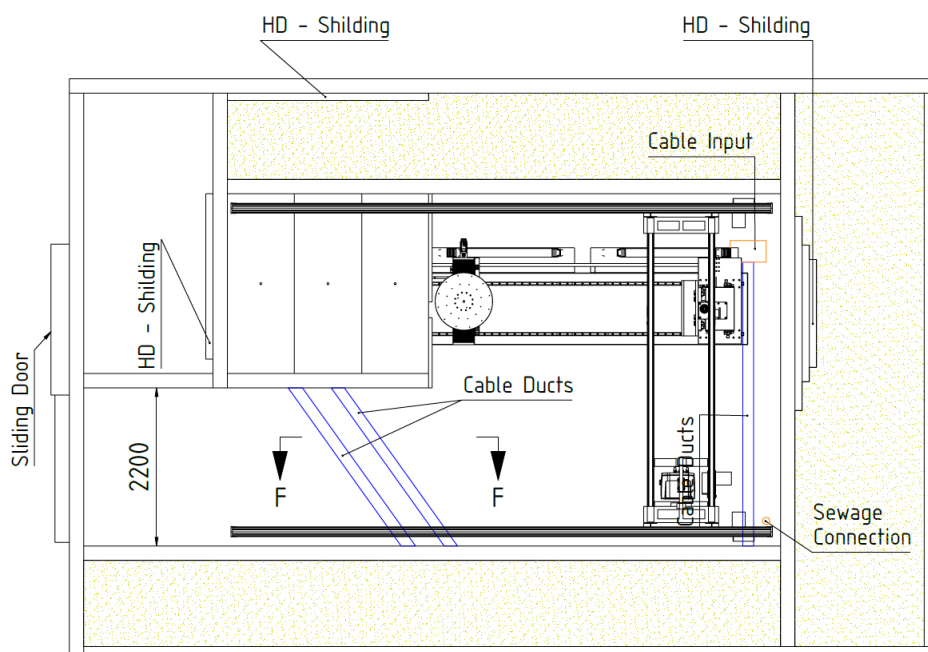


Figure 4. Floor plan of radiation protection facilities

图 4. 辐射防护设施平面布局图

最后,在主照射方向采用高强度混凝土预制构件、铅构件、低密度砂和混凝土屏蔽块复合屏蔽主射束和中子束,其余方向通过预制构件、低密度砂和混凝土屏蔽块复合屏蔽散射线和散射中子束。

5. 屏蔽实验室建设实施过程

5.1. 整体布局与尺寸参数

实验室整体施工建设严格按照定制化方案落地,整体布局方面,9 MeV 电子直线加速器工业 CT 自带检测房整体安装于加速器检测室内,检测室南侧依次布置迷道、设备间与操作室,设备间用于放置电源柜、水冷系统等配套设备,加速器射束定向向东,西南侧配套设置迷道结构。检测房整体尺寸为东西净长 7.2 m、南北净宽 4.6 m、净高 4.0 m。

5.2. 各方位屏蔽结构配置

各防护面采用差异化复合防护结构,其中西防护面为 2200 mm 混凝土 + 150 mm 铅板,北防护面为

1600 mm 混凝土 + 150 mm 铅板, 东向主照射防护面为 2200 mm 混凝土 + 400 mm 铅板, 南防护面为 1600 mm 混凝土 + 100 mm 铅板, 室顶防护结构为 1000 mm 混凝土 + 200 mm 铅板。检测房西侧设置电动平移式铅钢结构防护门, 用于工件与人员进出, 防护门屏蔽能力达 250 mm Pb, 门洞尺寸 2.2 m × 2.6 m, 防护门尺寸 2.6 m × 3.0 m, 门体与四周防护面搭接量均为 20 cm, 彻底杜绝缝隙辐射泄露问题, 实验室搭建及内景见图 5 和图 6。



Figure 5. Radiation shielding laboratory setup process

图 5. 辐射屏蔽实验室搭建过程图



Figure 6. Interior view of the radiation shielding laboratory

图 6. 辐射屏蔽实验室内景图

5.3. 安全防护设施与分区管理体系

5.3.1. 安全防护配套设施

实验室配套完善的辐射安全防护设施与管控体系, 所有防护门外、设备本体及操作室门上均设置电离辐射警告标志与工作状态指示灯。全场共设置 7 个紧急停机按钮, 分别布置于设备东西两侧、检测房南北防护面、防护门外侧、设备间电控箱及操作台, 设备与防护门、紧急停机按钮、射线源开关钥匙实

现全维度安全连锁。检测房内外多处布设连锁式声光预警装置，配套多组固定式剂量监测设备，实时采集辐射数据。室内布设 5 台监控设备，搭配室内外对讲系统，实现全程可视化监控与实时通讯。

5.3.2. 场地分区管理与通风防护

场地实行分区管控，检测房墙体内部区域划定为控制区，墙体外部相邻的检测室、走廊、迷道、设备间及操作室划定为监督区，实现分级安全管理。通风系统采用顶进底排布局，进风口设于室顶东侧，排风口设于南防护面西侧距地 0.2 m 处，配备机械排风装置，通风量 2000 m³/h，废气接入厂区总排风管道由楼顶统一达标排放。同时配套配齐个人剂量计、个人剂量报警仪、X-γ 辐射巡检仪等防护与检测设备，全面保障操作人员人身安全与场地辐射监测全覆盖。

5.4. 辐射泄漏标准化测量方案

5.4.1. 测量仪器

便携式 X-γ 巡检仪型号：FH40G+FHZ672；能量响应区间 15 keV~10 MeV，完整覆盖 9 MeV 加速器轫致 X 射线能区；具备中国计量科学研究院出具辐射计量校准证书，校准有效期 12 个月；可同步输出吸收剂量率(Gy/h)与剂量当量率(μSv/h)，内置 wR = 1 自动完成剂量换算。

5.4.2. 双工况辐射泄漏检测结果

分别在 9 MeV 满功率、无工件和含铸件工况下完成全域辐射采集，各墙体、门缝、操作区域及楼上点位辐射水平均远低于国标 2.5 μSv/h 限值，检测数据如表 3 和表 4 所示。

Table 3. Radiation leakage rate test results around the room (no workpiece condition)

表 3. 检测房周围辐射泄露率检测结果(无工件工况)

序号	位置	吸收剂量率(×10 ⁻⁸ Gy/h)	剂量当量率(μSv/h)
A1	检测房北防护面外 30 cm 处	13	0.13
A2	检测房东防护面外 30 cm 处	12.9	0.129
A3	检测房南防护面外 30 cm 处	12.2	0.122
A4	检测房西防护面外 30 cm 处	24.8	0.248
A5	检测房防护门北侧门缝外 30 cm 处	21.9	0.219
A6	检测房防护门南侧门缝外 30 cm 处	31.9	0.319
A7	检测房防护门上侧门缝外 30 cm 处	25.1	0.251
A8	检测房防护门下侧门缝外 30 cm 处	27.5	0.275
A9	检测房防护门中间位置外 30 cm 处	22.9	0.229
A10	设备间	11.7	0.117
A11	操作室操作位	12.3	0.123
A12	管线口处	12.1	0.121
A13	9 MeV 加速器室楼上	11.6	0.116

备注：加速器工业 CT 开机状态时为 9 MeV，主射束向东，无工件。

Table 4. Measurement results of radiation leakage outside the shield under cast component conditions
表 4. 含铸件工况下屏蔽体外辐射泄漏测量结果

序号	监测点位	吸收剂量率 ($\times 10^{-8}$ Gy/h)	剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	相对无工件 工况增幅
B1	检测房北防护面外 30 cm 处	15.2	0.152	16.9%
B2	检测房东防护面外 30 cm 处	14.7	0.147	14.0%
B3	检测房南防护面外 30 cm 处	13.9	0.139	13.9%
B4	检测房西防护面外 30 cm 处	28.6	0.286	15.3%
B5	检测房防护门北侧门缝外 30 cm 处	25.3	0.253	15.5%
B6	检测房防护门南侧门缝外 30 cm 处 (泄漏最大值)	36.8	0.368	15.4%
B7	检测房防护门上侧门缝外 30 cm 处	29.0	0.290	15.5%
B8	检测房防护门下侧门缝外 30 cm 处	31.8	0.318	15.6%
B9	检测房防护门中间位置外 30 cm 处	26.4	0.264	15.3%
B10	设备间	13.4	0.134	14.5%
B11	操作室操作位	14.1	0.141	14.6%
B12	管线口处	13.8	0.138	14.0%
B13	9 MeV 加速器室楼上	13.4	0.134	15.5%

备注：加速器工业 CT 开机状态时为 9 MeV，检测室内放置 80 mm 铸铁发动机缸体。

金属铸件会反射散射 X 射线，全点位辐射剂量当量较空载工况提升 13.9%~16.9%；防护门门缝为全场辐射泄漏最高位置，两类工况下均为剂量控制点。加载工件后全场最大剂量当量仅 0.368 $\mu\text{Sv/h}$ ，远低于 1.0 $\mu\text{Sv/h}$ 设计控制目标与 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 国标限值，复合屏蔽结构对工件散射辐射具备充足衰减余量。

6. 国内外辐射防护标准限值对比论证

为验证本屏蔽实验室防护性能的通用性，系统对比中、德、法、美工业高能射线辐射防护标准的边界剂量限值：国内 GB 18871 要求工业射线装置墙外公众区域剂量当量不超过 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ ，本项目带工件实测最高值仅 0.368 $\mu\text{Sv/h}$ ，安全余量充足；德国 2018 版 StrlSchV [13] 条例、法国 NFC74100:2017 [14] 均限定室外公众区域限值 1.0 $\mu\text{Sv/h}$ ，本项目设计值即按 1.0 $\mu\text{Sv/h}$ 管控，实测全部点位均达标；美国 21CFR1020.40 标准 [15] 规定非公共区域上限 2.0 $\mu\text{Sv/h}$ ，现场峰值远低于该数值，整套屏蔽防护均可满足四国规范要求。

7. 结束语

本次建成的加速器工业 CT 防辐射实验室，可实现高能射线与中子束的高效屏蔽，实验室配齐各类安全防护设施与应急处置装置，能有效规避人员违规操作风险，全面筑牢实验室辐射安全防线，整体安全防护水平显著提升。

本实验室辐射泄漏剂量率控制在 ≤ 1.0 $\mu\text{Sv/h}$ 以内，不仅满足德国 StrlSchV [13]、法国 NFC74100 [14]

和美国 21CFR1020.40 [15]等国际辐射防护相关标准,同时优于我国《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》GB 18871 规定的 $\leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$ 限值要求,辐射防护性能达标且富余充足,可长期稳定、安全开展工业 CT 检测相关试验与作业。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [2] 王兴华, 侯铁钢, 苏晓书, 等. 基于 MC 方法 9 MeV 无损检测电子直线加速器辐射屏蔽优化设计[J]. 核电子学与探测技术, 2025, 45(1): 134-139.
<https://here.cbpt.cnki.net/portal/journal/portal/client/paper/3b51ca6d71d012ce35a7b47b8f6a8a34>
- [3] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GBZ/T 250-2014 工业 X 射线探伤室辐射屏蔽规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [4] 生态环境部. HJ/T 10.3-1996 辐射环境保护管理导则 电磁辐射环境影响评价方法与标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/other/pjjsdz/199606/t19960601_71431.shtml
- [5] 朱宇虹. 9 MeV 电子直线加速器的屏蔽设计[J]. 电焊机, 2010(1): 55-58.
<http://lib.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=32803224>
- [6] 刘显坤, 刘颖, 唐杰, 等. 高能射线及其屏蔽材料[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(6): 1034-1038.
- [7] 李占鹏, 王一迪, 唐波, 等. 无损检测加速器辐射防护屏蔽模拟设计[J]. 核电子学与探测技术, 2020, 40(1): 133-138.
- [8] IAEA (2007) IAEA-TECDOC-1560 Dose Reporting in Ion Beam Therapy. International Atomic Energy Agency.
- [9] International Atomic Energy Agency (2011) Radiation Safety in Industrial Radiography: IAEA Safety Standards Series No. SSG-11. IAEA.
- [10] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3095-2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [11] 李星洪. 辐射防护基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1982.
- [12] 赵莲峰, 战景明, 薛向明, 等. 某工业探伤 9 MeV 电子加速器探伤室的辐射安全防护效果评价[J]. 职业与健康, 2023, 39(9): 1176-1181.
- [13] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) (2018) Ordinance on Protection against the Harmful Effects of Ionising Radiation: Radiation Protection Ordinance (Strahlenschutzverordnung, StrlSchV). Germany. https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv_2018/BJNR203600018.html
- [14] AFNOR (1981) NF C74-100 Radiology equipment: X-ray apparatus. Construction and tests. Requirements. French Standardization Association, Paris.
<https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/nf-c74100/radiology-equipment-xray-apparatus-construction-and-tests-requirements/fa032420/5261>
- [15] FDA (2023) 21 CFR § 1020.40 Cabinet X-Ray Systems. U.S. Government Publishing Office.