

工业 CT 防辐射实验室建造

刘东, 刘宁, 丁富才, 曹进爱, 李雪梅

(潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261001)

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 30cm 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, 作者提出了复合式结构, 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

Liu Dong, Liu Ning, Ding Fucan, Cao Jinai, Li Xuemei

(Weichai Power Co., LTD., Weifang Shandong 261001)

Abstract: Industrial CT is a necessary instrument and equipment for industrial nondestructive testing. However, improper treatment of the laboratory using this kind of instrument will cause radiation pollution to the surrounding environment. According to the current national standards, the X-ray dose equivalent rate of the surrounding X-ray dose should not be greater than $2.5\mu\text{Sv/h}$ at any monitoring point where the surface of the shielding body (wall) in the workplace and surrounding environment is greater than or equal to 30cm. In order to meet the requirements of the standard, the authors put forward a composite structure during the construction of the laboratory, and added a variety of treatment measures such as radiation leakage. The test results show that the radiation leakage rate is reduced to less than $1.0\mu\text{Sv/h}$.

Keywords: industrial CT; X-ray; radiation leakage rate; laboratory

1 工业 CT 防辐射实验室建造背景和应用价值

(1) 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、看的清的目标，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 9MeV 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。

(2) 应用价值：有效屏蔽高能射线和中子束；多种安全防护和应急装置，防止人员误操作，提高安全等级。

(3) 初步效果：建成的加速器工业 CT 防辐射实验室辐射泄露率 $\leq 1.0\mu\text{Sv/h}$ ，不仅满足德国 R6V，法国 NFC 74 100 和美国性能标准 21 CFR 1020.40 的辐射安全防护要求，而且优于我国标准 GB18871 所规定的 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ 辐射泄露率要求。

2 创新点与优势

(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 9MeV 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，本项目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。

(2) 精准屏蔽：通过 9MeV 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。

(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、喷气、排水、混凝土养护等过程，所以施工更简单快捷，更环保。

3 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。

3.1 设计原理

首先，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。

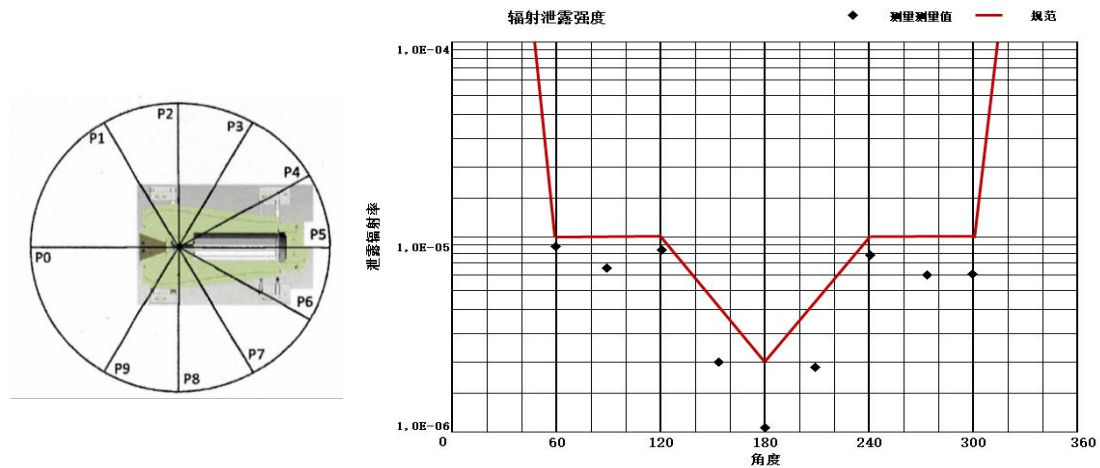


图1 X射线发生及不同位置泄露剂量率分布图（俯视）

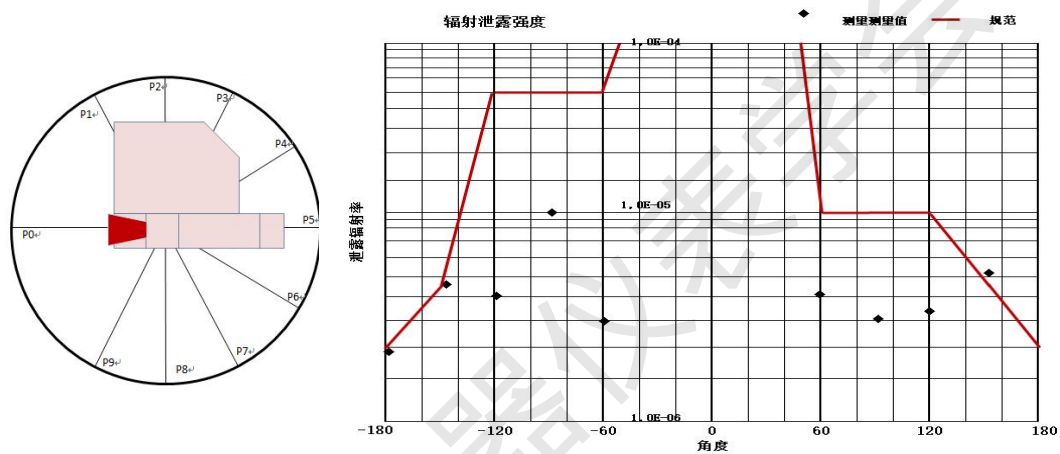


图2 X射线发生及不同位置泄露剂量率分布图（侧向）

其次，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。

3.2 主要放射性污染物和污染途径

(1) X射线电子加速器电子枪产生的电子最高能量为9MeV，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。

(2) 非放射性有害气体在加速器开机运行时，电子束与检测房内空气可通过电离作用产生臭氧(O₃)和氮氧化物(NO_x)，在NO_x中以NO₂为主，它们是具有刺激性作用的非放射性有害气体。

(3) 放射性废水加速器设备中设计有冷却水循环系统，这部分水可能由于活化而含有较强的放射性。本项目电子加速器最大能量为9MeV，因此活化物产生量较小，且冷却水中被活

化而形成的放射性核素主要为 ^{15}O 、 ^{16}N ，它们的半衰期分别为 2.1min 和 7.3s，半衰期很短，只需放置一定时间其活度就可以衰减到较低的水平。本项目加速器一次冷却水为内循环去离子水，正常运行时在内部不断循环，不外排，当内循环水量低于水位时冷却水系统即自动报警，工作人员可及时补充去离子水，保证系统的正常运行。

(4) 非放射性固体废物加速器退役后产生的废靶由供货商回收。

3.3 设计过程

3.3.1 X 射线的防护机理

X 射线，是指高能的电磁辐射（无静止质量，无电荷）。X 射线是具有短波长的高能光子，因此频率非常高。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。

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。半值层有两个主要特点：

- 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 100keV 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。

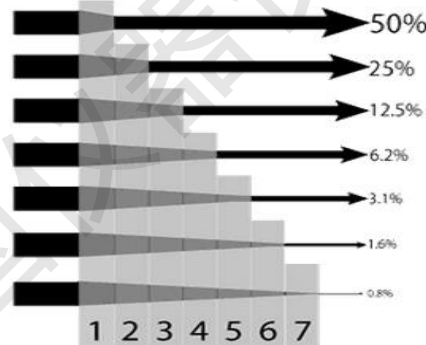


表 1 半值层厚度表

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

如果要将 100keV 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，100keV X 射线在水中的半值层为 4.15cm，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 4.15cm，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 9MeV 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。

表 2 高能射线半值层厚度表

源	半厚度值		
	铅板厚度 (mm)	混凝土厚度	
		(mm)	in
50 kVp	0.07	8.8	0.15
50 kVcp	0.06		
70 kVp		10.2	0.4
75 kVp	0.17		
75 kVcp	0.19		
100 kVp	0.26	16.5	0.65
100 kVcp	0.30		
125 kVp	0.29	19.1	0.75

150 kVp	0.32	21.8	0.85
150 kVcp	0.32		
200 kVp	0.43	25.9	1.02
200 kVcp	0.43		
250 kVp	0.90	27.7	1.09
250 kVcp	0.98		
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		61	2.4
3.0 MV		68.6	2.7
4.0 MV		83.8	3.3
6.0 MV		102	4
10 MV		117	4.6

3.3.2 结构设计方案

1、检测室所有入口处的防护门应与加速器工业 CT 连锁。在防护门开启时，加速器不能加高压出束。加速器出束状态下防护门被开启，加速器应自动切断高压停止出束，通过控制台的复位操作后，方可再一次加高压出束；检测室人员入口应设置迷道，有用线束朝向应尽量避开工件出入口、控制室和迷道。检测室迷道防护门内侧应安设标识明显的紧急开门开关，确保异常情况时人员能从检测室内迅速开门离开。

2、检测室、迷道、加速器机头及工业 CT 操作台上应安装紧急停机按钮，检测室墙面、迷道内等处应安装检查复位按钮。紧急停机按钮、复位按钮及紧急开门开关处应设置有明显标识。在紧急停机后，只有通过再次复位后才能重新启动加速器。

3、检测室应设置通风装置，设计上确保检测室内外空气质量达到 GB3095 要求。

4、检测室应设置固定式剂量监测装置，对加速器的出束状态进行监测。

5、检测室内应有监视装置，其摄像头的安装应保证检测室内，特别是加速器有用线束区域内可视，并在控制室内设置专用监视器。必要时在检测室与控制室之间安设通讯设备。

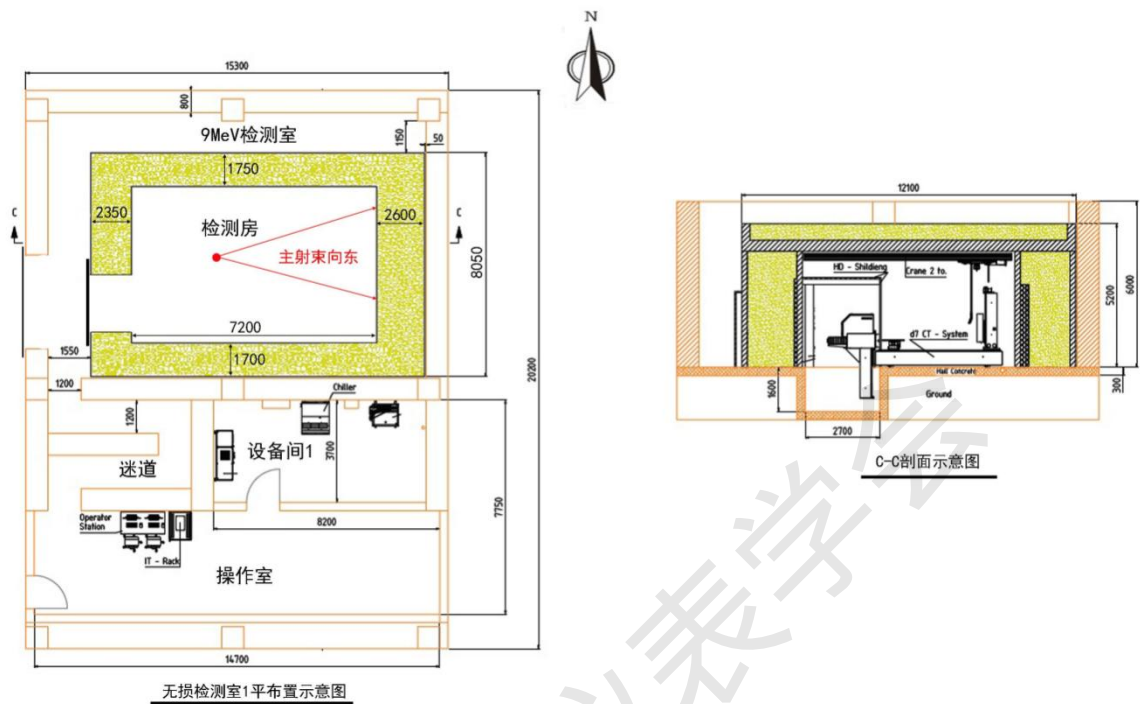


图3 辐射防护设施平面布局图

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。

3.3.3 屏蔽实验室建设实施过程。

(1) 整体布局：电子直线加速器工业 CT 自带一套屏蔽装置（简称“检测房”），整体安装于 9MeV 加速器室的 9MeV 检测室内，9MeV 检测室南侧布置有迷道、设备间和操作室，其中设备间内放置电源柜、水冷系统等设备。加速器射束方向定向向东，同时在 9MeV 检测室西南侧布置迷道。

(2) 尺寸及面积：检测房东西净长 7.2m、南北净宽 4.6m、净高 4.0m。

(3) 四周防护门、室顶：西防护面：2200mm 混凝土+150mm 铅板；北防护面：1600mm 混凝土+150mm 铅板；东防护面：2200mm 混凝土+400mm 铅板；南防护面：1600mm 混凝土+100mm 铅板；室顶：1000mm 混凝土+200mm 铅板

(4) 防护门：检测房西侧设 1 个防护门，用于工件及人员进出；防护门为电动平移式，铅钢结构，屏蔽能力 250mmPb；门洞宽 2.2m、高 2.6m，防护门宽 2.6m、高 3.0m；防护门左、右、上、下与四周防护面搭接量均为 20cm。

(5) 辐射安全与防护设施：

1) 防护门外设置工作状态指示灯、电离辐射警告标志。9MeV 检测室西侧门、操作室西侧门上及加速器工业 CT 设备上设置电离辐射警告标志。

2) 设置门机联锁和紧急停机按钮（7 个），紧急停机按钮分别设于加速器工业 CT 装置西侧、东侧，检测房内北防护面中部和南防护面中部、检测房外西防护面南侧（靠近防护门）、设备间电控箱、操作室操作台上。且加速器系统与检测房防护门、紧急停机按钮、射线源开关键匙等实现安全联锁。

3) 检测房外防护门南侧、检测房内东防护面和北防护面各设置 1 个工作状态指示灯，并与加速器联锁，具备声、光预警功能。

4) 检测房内东防护面、西防护面南侧（靠近防护门）各设置一固定式剂量监测装置。

5) 检测房内设置 5 个监控设备，同时检测房与操作室之间设置对讲设备。

(6) 分区管理：检测房四周墙壁围成的区域划为控制区，与墙壁外部相邻的 9MeV 检测室、9MeV 检测室西侧走廊、迷道、设备间及操作室划为监督区。

(7) 通风设施：检测房内设置通风系统，进风口位于检测房室顶东侧，排风口位于南防护面西侧（距地高度约 0.2m），内安装机械排风装置，通风量为 2000m³/h，排风口连接质量研究中心总排风管道，废气经总管道于楼顶排放。

(8) 个人防护用品及辅助防护设施：个人剂量计 4 支（人手 1 支，由个人剂量检测单位配发）、个人剂量报警仪 2 部及 X-γ 辐射巡检仪 1 台。

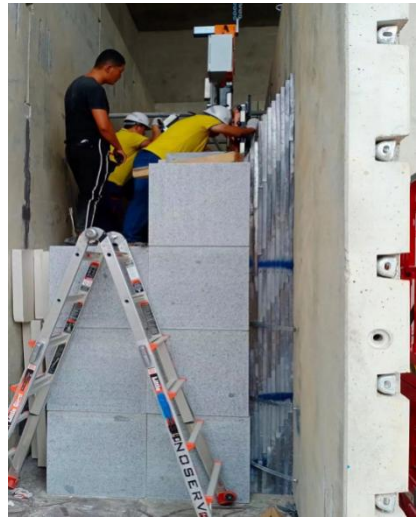


图 4 主照射面防护和进出通道防护施工图



图 5 辐射屏蔽实验室搭建过程图



图 6 辐射屏蔽实验室内景图

表 2 检测房周围辐射剂量率监测结果 单位： $\times 10^{-8}\text{Gy/h}$

序号	位置	测量值
A1	检测房北防护面外 30cm 处	13

A2	检测房东防护面外 30cm 处	12.9
A3	检测房南防护面外 30cm 处	12.2
A4	检测房西防护面外 30cm 处	24.8
A5	检测房防护门北侧门缝外 30cm 处	21.9
A6	检测房防护门南侧门缝外 30cm 处	31.9
A7	检测房防护门上侧门缝外 30cm 处	25.1
A8	检测房防护门下侧门缝外 30cm 处	27.5
A9	检测房防护门中间位置外 30cm 处	22.9
A10	设备间	11.7
A11	操作室操作位	12.3
A12	管线口处	12.1
A13	9MeV 加速器室楼上	11.6

备注：加速器工业 CT 开机状态时为 9MeV，主射束向东，无工件。



无损检测室1平布置示意图

A1-A13: X-γ辐射剂量率检测布点