

自屏蔽X射线无损检测装置的辐射安全分析

王美霞*, 许志强, 徐海娟, 钟蝶娴, 梁 旭

广东省职业病防治院, 广东 广州

收稿日期: 2022年7月24日; 录用日期: 2022年8月24日; 发布日期: 2022年8月30日

摘 要

目的: 对工业生产线上使用的带有自屏蔽防护的X射线无损检测装置辐射安全及防护效果进行评价。方法: 以某企业用于汽车零部件缺陷检查的带自屏蔽铅房的X射线无损检测装置为研究对象, 分析该装置的辐射安全及射线防护效果。结果: 正常工况下该X射线无损检测装置屏蔽体外30 cm处周围剂量当量率均满足标准要求的剂量率参考控制水平要求, 采取的辐射安全措施满足标准要求。结论: 在采取射线屏蔽、安全联锁及遵守操作规程等辐射安全措施后, 工作人员受照的年有效剂量可控制在审管部门核准的剂量控制限值以内, 带自屏蔽的X射线无损检测装置能满足辐射安全与射线防护要求。

关键词

X射线, 自带屏蔽, 无损检测, 剂量率, 屏蔽计算

Radiation Safety Analysis of Self-Shielding X-Ray Nondestructive Testing Device

Meixia Wang*, Zhiqiang Xu, Haijuan Xu, Diexian Zhong, Xu Liang

Guangdong Province Hospital for Occupational Disease Prevention and Treatment, Guangzhou Guangdong

Received: Jul. 24th, 2022; accepted: Aug. 24th, 2022; published: Aug. 30th, 2022

Abstract

Objective: The purpose of the research is to evaluate the radiation safety and protection effect on X-ray nondestructive detector with self-shielding used in industrial production line. **Methods:** The research method was taking the X-ray nondestructive detector with self-shielding lead cabinet as the research object, and the radiation safety and protection effect of the device were analyzed. **Results:** Under normal working conditions, the dose equivalent rate around 30 cm outside the

*通讯作者。

shield of the X-ray nondestructive detector meets the requirements of the standard dose rate reference control level, and the radiation safety measures taken meet the requirements of protection standard. Conclusion: After taking radiation safety measures such as radiation shield, safety interlock and complying with operation regulations, the annual effective dose of workers can be controlled within the dose control limit approved by the management department. The X-ray non-destructive detector with self-shielding meets the radiation safety and protection requirements.

Keywords

X-Ray, Self-Shielding, Nondestructive Testing, Dose Rate, Shielding Calculation

Copyright © 2022 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

工业上常用的无损检测技术包括射线检测、超声检测、渗透检测、磁粉检测以及涡流检测。其中,射线检测、超声检测主要是针对被检测工件内部缺陷,渗透检测、磁粉检测及涡流检测主要是针对被检测工件近表面缺陷。超声检测对面积型缺陷(如裂纹类)比较敏感,缺点是对体积型缺陷(如孔类、夹杂类)的敏感性较差,不易检查形状复杂的工件;射线检测对体积型缺陷比较敏感,能较直观地显示被检测工件内部缺陷的大小和形状,但因射线属于电离辐射,防护不当会对人体产生危害[1] [2] [3]。随着我国经济的发展,射线无损检测技术应用日益广泛,在利用它为人类谋利益的同时必须要注意防范其可能带来的潜在放射性危害。射线无损检测装置的辐射安全与射线防护已经成为无损检测领域的一个重要课题[4] [5] [6] [7]。

2. 无损检测原理

射线检测又叫射线探伤,是利用射线对材料具有一定穿透能力和材料对射线有衰减的特性来检查材料内部缺陷的一种无损探伤方法。射线的种类很多,易于穿透物质的有 X 射线、 γ 射线、中子射线 3 种[1] [2] [3]。其中 X 射线被广泛用于汽车零部件内部缺陷检测,X 射线无损检测装置通过高速电子轰击阳极靶产生 X 射线,透照被检测的工件,并在胶片或数字成像装置上得到被检测工件的内部结构图像,能快速准确地判断被检测工件的内部结构有无缺陷。

3. 对象与方法

3.1. 对象

3.1.1. X 射线装置

以某企业 1 台用于汽车零部件缺陷检查的带有自屏蔽的 X 射线无损检测装置为研究对象。该 X 射线无损检测装置额定管电压为 160 kV,额定管电流 5 mA,过滤材料 3 mm 铝,X 射线束圆锥角 $40^\circ \times 30^\circ$ 。X 射线管采用循环油冷和风冷的方式冷却。

3.1.2. 机械结构

主要由 C 型臂、支撑立柱、行走小车和行走轨道构成。可完成 C 型臂升降运动和 $\pm 15^\circ$ 摆动运动;射线管、平板探测器平移运动;检测小车进出及 360° 旋转运动。X 射线无损检测装置结构示意图如图 1 所示。

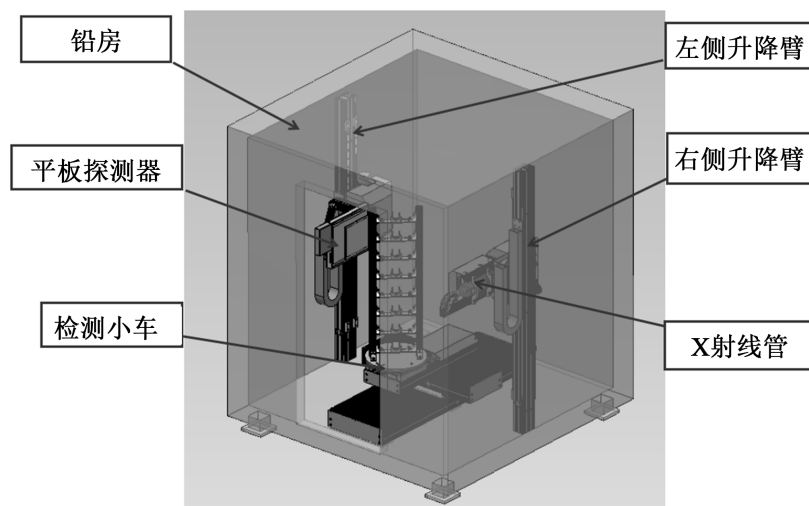


Figure 1. Structure diagram of X-ray nondestructive testing device
图 1. X 射线无损检测装置结构示意图

3.1.3. 图像显示及处理

用于汽车零部件实时动态透视成像，不产生废弃照片、显影液和定影液等危险废物。平板探测器有效感光区域 $205\text{ mm} \times 205\text{ mm}$ ，空间分辨率 $2.8\text{ Lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ ，像素矩阵 1024×1024 ，像素尺寸 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.1.4. 自屏蔽设计

无损检测装置防护箱壳体 6 个面及铅门采用双层钢板压合铅板结构，壳体规格长 $\times$ 宽 $\times$ 高 = $2145\text{ mm} \times 2145\text{ mm} \times 2337\text{ mm}$ ，铅门规格长 $\times$ 宽 = $1650\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ ，上壳、下壳、正面、反面、右面：5 mm 铅板；左面(有用线束)：8 mm 铅板，铅门厚度：5 mm。X 射线无损探伤装置规格如图 2 所示。

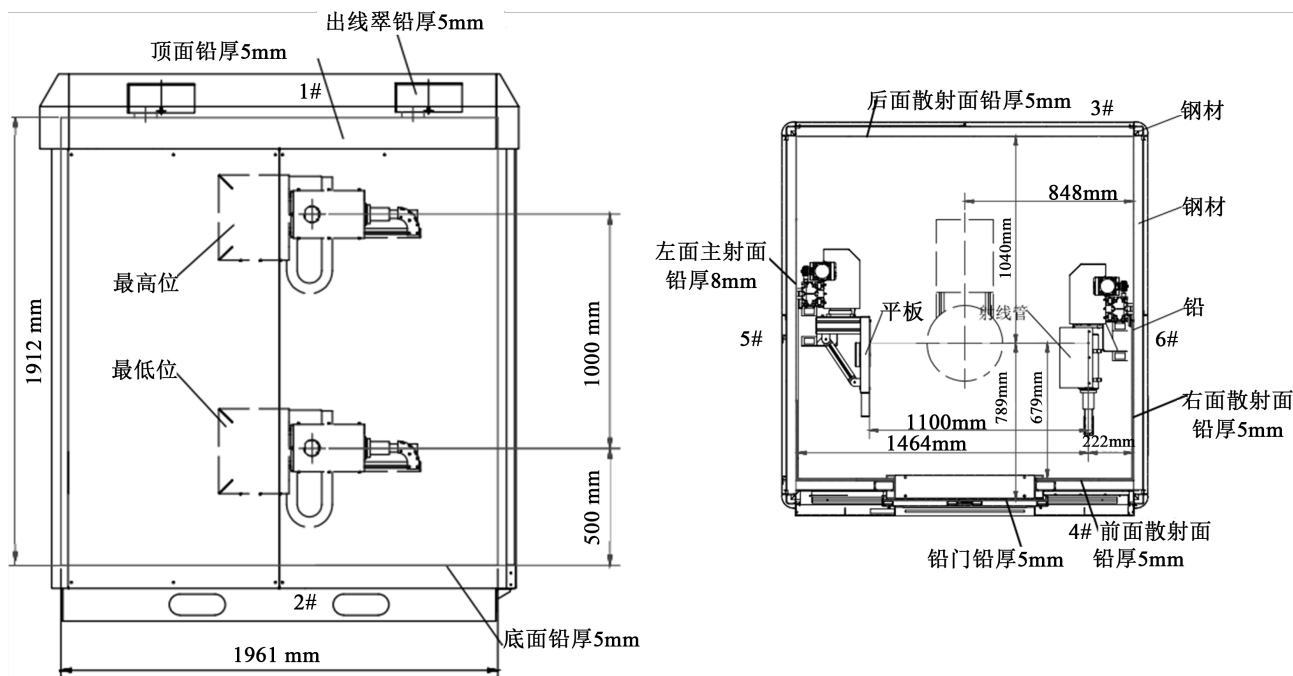


Figure 2. Schematic diagram of focus in side view and top view
图 2. 侧视俯视关注点示意图

3.2. 方法

3.2.1. 屏蔽性能

1) 射线屏蔽防护原则

根据《工业 X 射线探伤室辐射屏蔽规范》(GBZ/T250-2014) [8], 相应有用线束的整个墙面均考虑有用线束屏蔽; 散射辐射考虑以 0°入射检测工件的 90°散射辐射; 当可能存在泄漏辐射和散射辐射的复合作用时, 通常分别估算泄漏辐射和散射辐射, 当他们的屏蔽厚度相差一个 TVL (屏蔽材料什值层, 单位 mm) 或更大时, 采用其中较厚的屏蔽, 当相差不足一个 TVL 时, 则在较厚的屏蔽上增加一个 HVL (屏蔽材料半值层, 单位 mm)。

对于无顶或薄顶的探伤室, 还应考虑穿过探伤室顶的辐射与室顶上方空气作用产生的天空散射辐射对探伤室外地面附近人员的影响。自屏蔽型无损检测装置铅房顶部与非射线主射方向的屏蔽墙通常采用相同的防护厚度, 天空散射的影响可以忽略。

2) 屏蔽计算公式

a) 关注点达到剂量率参考控制水平时, 屏蔽设计所需的屏蔽透射因子按式(1)计算, 再由式(2)计算出相应的屏蔽物质厚度 X。

$$B = \frac{\dot{H}_c \cdot R^2}{I \cdot H_0} \tag{1}$$

$$X = -TVL \cdot \lg B \tag{2}$$

b) 在给定屏蔽物质厚度 X 时, 由式(3)计算出相应的屏蔽透射因子。关注点的剂量率按式(4)计算:

$$B = 10^{-X/TVL} \tag{3}$$

$$\dot{H} = \frac{I \cdot H_0 \cdot B}{R^2} \tag{4}$$

B——屏蔽透射因子; $\dot{H}_c$ ——剂量率参考控制水平, $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$; R——辐射源点至关注点距离, m; I·X 射线检测装置在最高管电压下的常用最大管电流, mA; H_0 ——距辐射源点 1 m 处输出量, $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot(\text{mA}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

对于泄漏辐射, 不同 X 射线管电压距辐射源点 1 m 处 X 射线管组装体的泄漏辐射剂量率见 GBZ/T250-2014 表 1。对于散射辐射, 还应考虑辐射野面积和散射因子。

3) 屏蔽计算参数

根据设备厂家提供的资料以及 GBZ/T250-2014 的标准要求, 屏蔽计算参数见表 1。

Table 1. Shielding calculation parameter table

表 1. 屏蔽计算参数表

辐射类型	参数类型	数值	备注
有用线束	H_0 : 距辐射源点 1 m 处输出量	$5.94 \text{ mGy}\cdot\text{m}^2\cdot(\text{mA}\cdot\text{min})^{-1}$	按 GBZ/T250-2014 附录 B 的表 B.1 插值法确定
	TVL: 什值层	1.05 mmPb	依据 GBZ/T250-2014 附录 B 表 B.2 插值法确定
	HVL: 半值层	0.32 mmPb	插值法确定
泄漏辐射	H_L : 距辐射源点 1 m 处 X 射线管组装体泄漏辐射剂量率	$2.5 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$	依据 GBZ/T250-2014 表 1 确定
	TVL: 什值层	1.05 mmPb	依据 GBZ/T250-2014 附录 B 表 B.2 插值法确定
	HVL: 半值层	0.32 mmPb	插值法确定

Continued

散射辐射	H_0 : 距辐射源点 1 m 处输出量	$5.94 \text{ mGy}\cdot\text{m}^2\cdot(\text{mA}\cdot\text{min})^{-1}$	按 GBZ/T250-2014 附录 B 的表 B.1 插值法确定
	TVL: 什值层	0.96 mmPb	依据 GBZ/T250-2014 表 2 和附录 B 表 B.2 插值法确定
	HVL: 半值层	0.29 mmPb	

3.2.2. 辐射安全要求

根据《工业 X 射线探伤放射防护要求》(GBZ117-2015) [9], 日常使用中应定期对辐射防护设施进行检查和维护, 确保门机连锁、警示标示、剂量监测等正常使用。应加强放射工作人员的放射防护知识培训、工业 X 射线无损检测知识及相关法律法规培训, 定期组织放射工作人员进行职业健康检查, 放射工作人员应佩戴个人剂量计, 并建立职业健康和剂量健康档案, 保障从业人员的放射防护安全与职业健康。建立具有可操作性的辐射事故应急预案, 并定期演练。

4. 结果与分析

4.1. 屏蔽计算结果

以剂量率控制水平计算机器壳体各屏蔽厚度, 以设计厚度计算关注点所在面周围剂量当量率, 屏蔽计算结果及与剂量率参考控制水平符合情况见表 2。从表中可知, 以设计厚度计算关注点所在面周围剂量当量率为 $0.14\sim 0.51 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, 均小于控制值 $2.5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, 所有关注点所在面的屏蔽厚度均小于计算厚度, 辐射屏蔽设计合理。

Table 2. Shielding performance and dose rate compliance with reference control level
表 2. 屏蔽计算结果及与剂量率参考控制水平符合情况表

关注点	射线类型	屏蔽材料 设计厚度 (mmPb 铅板)	距离(m)	计算厚度 (mmPb)	符合情况		结论
					周围剂量当量率 $\dot{H}$ (保守估算, $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	剂量率参考控 制水平 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	
1#机器壳体	泄漏辐射 散射辐射	5	$0.41 + 0.3$	4.56	0.51	2.5	设计 可行
2#机器壳体	泄漏辐射 散射辐射	5	$0.50 + 0.3$	4.46	0.41		设计 可行
3#机器壳体	泄漏辐射 散射辐射	5	$1.04 + 0.3$	4.03	0.14		设计 可行
4#机器壳体 (铅门)	泄漏辐射 散射辐射	5	$0.68 + 0.3$	4.30	0.27		设计 可行
5#机器壳体	有用线束	8	$1.46 + 0.3$	5.63	0.20		设计 可行
6#机器壳体	泄漏辐射	5	$0.22 + 0.3$	4.16	0.33		设计 可行

4.2. 工作人员年有效剂量估算结果

根据企业提供, 无损检测工作人员操作位在铅门前侧, 工作人员日检测零件 $886 \text{ 个}\cdot\text{d}^{-1}$, 每个零件照射 12 s , 日最大照射时间 $2.95 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$, 年工作 250 d , 则年最大工作负荷 $738.3 \text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$, 工作人员年有效剂量

$E = H \cdot T \cdot U \cdot t = 0.20 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$, 其中居留因子 $T:1$, 使用因子 $U:1$, H : 工作人员操作位处剂量率。估算结果表明无损检测工作人员年有效剂量满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) [10]中规定的工作人员年有效剂量不超过 $20 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ 要求, 也满足依据 GB18871-2002 设定的工作人员年剂量控制值不超过 $5 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ 要求。

5. 结论

X 射线无损检测因其能快速、准确地检测出工件内部较深处的缺陷, 且不受工件材质限制, 已经成为无损检测技术中常用的检测方法。本文通过对一种带有自屏蔽的 X 射线无损检测装置的辐射安全及射线防护效果进行了分析, 并从偏保守角度估算了正常运行情况下所致的辐射工作人员的年有效剂量。结果表明, 在落实射线屏蔽、安全联锁及遵守操作规程等辐射安全措施条件下, 工作人员受照的年有效剂量可控制在审管部门核准的剂量控制限值以内, 带自屏蔽的 X 射线无损检测装置能满足辐射安全与射线防护要求; 通过加强工作场所日常管理和工作人员辐射安全教育培训, 注意劳动保护, 可以保证工作人员和公众的身体健康与安全。

参考文献

- [1] 庞林花, 文桂林. 报废回收汽车零部件再利用的无损检测技术[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(11): 55-62.
- [2] 文浩, 夏德志, 王福泉, 等. 汽车用铝压铸件内部缺陷无损检测技术与标准简析[J]. 中国标准化, 2021(S01): 152-156.
- [3] 吴东东. 无损检测技术及其在汽车零部件制造过程中的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2021(9): 149-150.
- [4] 赵兰才, 张丹枫. 放射防护实用手册[M]. 济南: 济南出版社, 2009: 381-388.
- [5] 王虹, 沈勇君, 唐维进, 等. 工业 X 射线探伤机房屏蔽设计及防护效果的探讨[J]. 中国辐射卫生, 2012, 21(2): 178-179.
- [6] 罗雷. 工业 X 射线探伤室的辐射屏蔽[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26(5): 588-590.
- [7] 郭垚, 陈凤娇, 石瑞芬, 等. 移动式 X 射线工业探伤意外照射现场模拟检测与受照剂量估算探讨[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28(3): 251-253.
- [8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GBZ/T250-2014 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.
- [9] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GBZ117-2015 工业 X 射线探伤放射防护要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB18871-2002 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, 2003.