

某工业 γ 射线探伤室的屏蔽设计与监测评价

向辉云 奚月明 张巍 常青 贾力博

(广西壮族自治区辐射环境监督管理站, 广西 南宁 530222)

【摘要】考虑到工业 γ 射线探伤作业时产生电离辐射, 文章基于探伤室投入运行后对周围剂量当量率的监测, 根据运行后的监测结果进行评价。同时对工业 γ 射线探伤作业中的辐射安全问题展开讨论, 旨在为工业 γ 射线的室内探伤项目建设及安全运行提供建议。

【关键词】工业 γ 射线探伤; 屏蔽设计; 辐射防护; 监测评价

【中图分类号】 TL7

【文献标识码】 A

【文章编号】 1008-1151(2020)06-0008-03

Shielding Design and Monitoring Evaluation of an Industrial γ - Ray Testing Room

Abstract: In consideration of the ionizing radiation produced during the industrial γ - ray inspection, this paper selects a certain industrial γ - ray inspection room, estimates the material and thickness of the required shield through the theoretical mode, and evaluates whether the design parameters of the protection of the inspection room meet the radiation safety management requirements. Through monitoring the dose equivalent rate around the detection room after it is put into operation, and evaluating according to the monitoring results after operation. At the same time, the radiation safety problems in the industrial γ - ray inspection are discussed in order to provide suggestions for the construction and safe operation of the industrial γ - ray indoor inspection project.

Key words: industrial γ - ray inspection; shielding design; radiation protection; monitoring and evaluation

当 ^{192}Ir 等放射性同位素衰变产生的 γ 射线穿过物体时, 如果物体局部存在气孔、裂缝、空洞等缺陷, 透过物体的 γ 射线的衰减程度将会发生改变, 使得透过物体局部的强度不一。射线通过零部件、照相胶片感光, 当物体局部(铸件或管道焊接处等)位置有裂缝等缺陷时, γ 射线穿过时会在照相胶片上出现条纹阴影、黑斑点的图像, 工作人员通过拍摄的底片即可对产品的质量进行检查和控制。工业 γ 射线探伤正是利用这一特性, 判断出物体内部是否存在缺陷, 从而检验金属构件、管道焊接的质量, 实现无损检测的目的。

随着无损检测的普及, 工业 γ 射线探伤项目在多行业多部门得到了广泛应用, 且探伤设备周围的剂量率较高, 因此需加强探伤设备的辐射防护。在探伤作业中, 为了安全管理和使用工业 γ 射线探伤源, 避免意外辐射事故的发生, 保护环境与人员安全, 也为了探伤机房的屏蔽设计最优化, 对工业 γ 射线探伤室的屏蔽能力予以重视关注。本文现以某一工业 γ 射线探伤室(使用 ^{192}Ir 密封放射源)为例, 介绍探伤室的屏蔽计算方法, 并对其辐射防护屏蔽计算结果与探伤室设计参数比较。在探伤作业时, 对投入运行后的探伤室及周围环境进行辐射环境监测, 通过对监测结果进行分析, 评价其辐射屏蔽效果。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 探伤源基本参数

在工业 γ 射线探伤室使用 1 台 γ 射线探伤设备, 内有 1 枚 ^{192}Ir 密封放射源, 出厂活度为 3.70×10^{12} Bq, 属于 II 类源。探伤用 ^{192}Ir 源的主要参数^[1]如表 1 所示。

表 1 探伤用 ^{192}Ir 源的主要参数

核素	半衰期	衰变方式	射线类型	主要射线能量 (keV)	射线能量百分比 (%)
^{192}Ir	74.2d	β^- γ	β^-	255	5.59
				536	41.3
				672	48.5
			γ	296	28.7
				308	29.6
				317	82.8
				468	48.0

1.1.2 探伤机工件基本情况

公司使用工业 γ 射线无损探伤对设备安装质量进行控制, 在不损伤材料或装置的情况下, 对其内部结构及质量进行监督。在进行探伤作业时, 探伤工件主要为金属管道, 工件的厚度范围在 1.44 mm~8.74 mm 之间。

1.1.3 探伤机工作原理

当工业 γ 射线探伤机不工作时, 工作容器处于关闭状态,

【收稿日期】 2020-04-09

【作者简介】 向辉云 (1989—), 女, 广西壮族自治区辐射环境监督管理站工程师, 从事辐射监测及评价工作。

放射源暂存在通道中。探伤设备外层设计有屏蔽体,一般为贫化铀或铅等材料构成,具有较好的屏蔽作用。探伤装置一般设计有多重安全联锁装置。当探伤仪工作时,通过旋转快门环以使曝光通道与源通道对准来操作偏心轮。使用连接器,将源的输送导管连接到容器。源导管的另一端构成照射头,照射头的作用是定位从工作容器中移出的放射源,以确保放射源始终在管内移动。使用操作遥控器以远程驱动放射源,该设备配备有放射源行程指示器;支架用于固定放射源的输送管,以确保放射源处于曝光的焦点位置;准直仪用于限制射线束方向,使用准直仪可以提高射线照相的质量。放射源通过导管进入工作位置以进行曝光摄影检查,如果铸件或管道焊缝中有裂纹,当 γ 射线穿过该裂纹,则黑色图像将会显示在胶卷上。

1.1.4 探伤室基本情况

公司在厂区建设有1座工业 γ 射线探伤室,探伤室墙体、迷道、屋顶均为混凝土结构。探伤室四周墙体总厚度为800 mm(含760 mm厚混凝土及40 mm厚硫酸钡水泥)。屋顶为660 mm实心水泥盖板,并涂有40 mm硫酸钡水泥抹灰、5 mm厚水泥砂浆。探伤室迷道墙体厚度为800 mm(含760 mm厚混凝土及40 mm厚硫酸钡水泥),迷道内走廊宽0.6m,总长度4.6 m。

探伤室北侧建有轨道电动式防护大门,供车间探伤工件进出。防护门为铅层外嵌钢板材料,厚230 mm,内衬8层10 mm厚铅板。探伤室与操作间迷道门口处建有轨道电动式防护小门,供探伤操作人员进出透照室。防护门的制作材料为铅层外嵌钢板,共80 mm厚,内衬1层10 mm厚的铅板。

防护门设置与报警装置联锁。当北侧防护门与东侧防护门同时关闭时,探伤室外的声光报警灯方才开启,此时提示探伤作业人员可以开始探伤作业。由操作间内X、 γ 剂量报警仪与防护门控制箱实行门机联锁功能,两道防护门关闭声光报警灯开启后在进行射线探伤作业时,操作间内的X、 γ 剂量报警仪处于剂量监测及报警状态,此时两扇防护门均无法打开。防护门上均设置了放射性作业警示标识、“当心电离辐射”的警告标志和中文警示说明,防止人员在探伤作业时进入该区域。

1.2 方法

1.2.1 标准限值

根据标准GBZ 132-2008^[2]第11.5节的内容,探伤室外各测点,包括门外30 cm、墙体外30 cm、顶棚上方1 m等位置的空气比释动能率小于等于2.5 $\mu\text{Gy/h}$,即控制水平 H_1 为2.5 $\mu\text{Gy/h}$ ^[2]。

1.2.2 无屏蔽层的计算过程

探伤室外的参考点与 γ 源的距离远大于 γ 源的几何尺寸5倍以上,可以将 γ 源看成是点状的。对 γ 点源距离为 r 的参考点,计算出无屏蔽时参考点的 γ 辐射空气吸收剂量率 H_2 , H_2 的计算公式如式(1)^[3]。

$$H_2 = \frac{A\Gamma_k}{r^2} \quad (1)$$

式(1)中, A 为源活度, Bq ; Γ_k 为空气比释动能率常数, $\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$; r 为源与参考点距离, m。

1.2.3 有屏蔽层的计算过程

在 γ 射线的探伤作业中,对辐射源设置屏蔽层,参考点处由于辐射源造成的当量剂量率为 H_3 ,计算公式如式(2)^[3]。

$$H_3 = \frac{1.45 \times 10^5 A\Gamma q}{r^2} \quad (2)$$

式中, Γ 为照射量率常数, $\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$; q 为居留因子,无量纲常数,根据不同居留情况(全部、部分、偶尔居留),分别取值1、1/4、1/16。四周墙体、防护门外的参考点为部分居留, q 取1/4,对屋顶外参考点,从偏安全角度考虑,取1。

屏蔽层厚度 d 对 γ 射线束的减弱倍数为 K ,透射比 η 。当控制水平为 H_1 时,减弱倍数为 K ,透射比为 η ,按式(3)、式(4)计算^[3]。

$$K = \frac{H_3}{H_1} = \frac{1.45 \times 10^5 A\Gamma q}{H_1 \cdot r^2} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{H_1 \cdot r^2}{1.45 \times 10^5 A\Gamma q} \quad (4)$$

1.2.4 屏蔽计算结果

在工业 γ 射线探伤机探伤作业时,主射线束为周向,对于四周墙体(东侧、南侧、西侧、北侧)、北侧铅防护门、东侧铅防护门、顶棚等均按照主屏蔽体的防护能力进行计算。计算结果见表2。

从表2的计算结果可知,该工业 γ 射线探伤项目所需的屏蔽层:探伤室东侧与西侧墙体需建设有650 mm混凝土,南侧、北侧墙体、屋顶(顶棚)需建设有560 mm。该工业 γ 射线探伤项目实际建设的屏蔽层为四周墙体760 mm混凝土与40 mm硫酸钡水泥、顶棚为660 mm实心水泥盖板与40 mm硫酸钡水泥、防护门为150 mm钢板与80 mm铅板,远超过设计的屏蔽参数。

表2中,将估算的屏蔽层厚度与实际建设的屏蔽层数据进行比较,可以得知,探伤室的设计参数满足辐射防护的安全要求。为了验证上述屏蔽计算方法的适用性,在探伤作业时,对投入运行后的探伤室及周围环境进行辐射环境监测,通过监测结果,对其辐射屏蔽能力进行评价。

表 2 探伤室屏蔽计算结果^[4]

参数	东侧墙	南侧墙	西侧墙	北侧墙	屋顶	防护门
距参考点距离 r	3.3 m	5.7 m	3.3 m	5.7 m	5 m	5.7 m
源的活度 A				3.70×10^{12} Bq		
空气比释动能率常数 Γ_k				3.15×10^{-17} Gy·m ² ·Bq ⁻¹ ·s ⁻¹		
无屏蔽时参考点的 γ 辐射剂量当量率	3.85×10^4 μ Gy/h	1.29×10^4 μ Gy/h	3.85×10^4 μ Gy/h	1.29×10^4 μ Gy/h	1.68×10^4 μ Gy/h	1.29×10^4 μ Gy/h
照射量率常数 Γ				8.966×10^{-19} C·m ² ·kg ⁻¹ ·Bq ⁻¹ ·s ⁻¹		
控制水平				2.5 μ Gy/h		
居留因子 q	1/4	1/4	1/4	1/4	1	1/16
减弱倍数 K	1.71×10^4	5.72×10^3	1.71×10^4	5.72×10^3	7.43×10^3	5.72×10^3
透射比 η	2.34×10^{-4}	6.99×10^{-4}	2.34×10^{-4}	6.99×10^{-4}	1.34×10^{-4}	1.75×10^{-4}
所需混凝土屏蔽厚度	650 mm	560 mm	650 mm	560 mm	560 mm	/
所需铅屏蔽厚度	/	/	/	/	/	55 mm
实际建设屏蔽层	760 mm 混凝土+40 mm 硫酸钡水泥	760 mm 混凝土+40 mm 硫酸钡水泥	760 mm 混凝土+40 mm 硫酸钡水泥	760 mm 混凝土+40 mm 硫酸钡水泥	660 mm 实心水泥盖板+40 mm 硫酸钡水泥	150 mm 钢板+80 mm 铅板

注：1、东墙、南墙、西墙、北墙外参考点与源的距离= γ 源与墙体的距离+墙体厚度+30 cm；2、屋顶参考点与源的距离= γ 源与墙体的距离+顶棚厚度+100 cm。

2 辐射环境监测与评价

2.1 监测仪器

现场监测时，采用的是白俄罗斯生产的 AT1123 型 X- γ 辐射剂量率仪，量程为 50 nSv/h~10 Sv/h，能响范围为 0.015 MeV~10 MeV，能够满足本次监测工作的需要（¹⁹²Ir 源的射线能量较低， γ 射线平均能量约为 0.3 MeV）。仪器已检定，使用时间在有效期内。

2.2 监测布点

在 ¹⁹²Ir 源机正常工作下，在工业 γ 射线探伤机房周围各侧墙体（东墙、南墙、西墙、北墙）、防护门、控制室等处布设监测点位，测量周围剂量当量率水平。探伤室位于地面一层，在建设时未设置楼梯，因此监测时探伤室上方无法到达，未布设点位。根据工业 γ 射线探伤机房场所周围的具体情况布设监测点位，并绘制出点位布设图，具体见图 1。

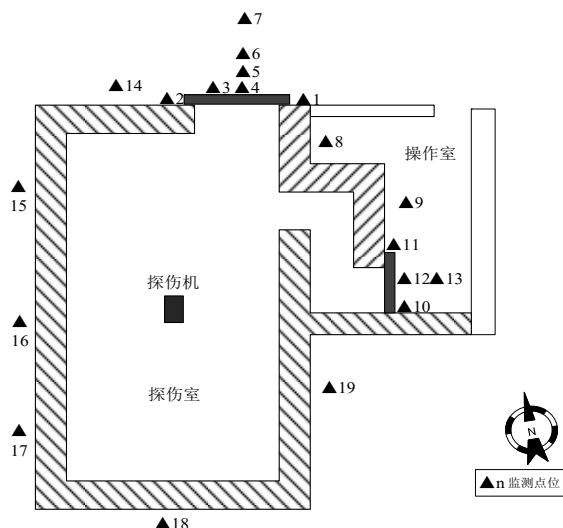


图 1 监测点位布设图

2.3 监测结果

当 ¹⁹²Ir 源机正常工作下，在工业 γ 射线探伤机房周围各侧屏蔽体（各侧防护门、东面墙体、南面墙体、西面墙体、北面墙体）外进行巡测。监测结果见表 3。

表 3 监测结果

监测点位	点位序号	周围剂量当量率范围 (单位: nSv/h)	备注
探伤室北面防护门	▲1~▲7	85~105	
操作室防护门	▲10~▲13	97~124	测时工
操作室内	▲8~▲9	107~111	况: 探伤
探伤室东面墙	▲19	107	室内放射
探伤室南面墙	▲18	96	源活度为
探伤室西面墙	▲15~▲17	94~106	77.3Ci
探伤室北面墙	▲14	96	
区域环境本底	/	85	/

注：表中数据未扣除仪器对宇宙射线响应值。

从上表的监测结果可知，当 ¹⁹²Ir 源机正常工作下，在工业 γ 射线探伤机房周围各侧屏蔽体外的周围剂量当量率与环境本底水平相比，未见显著升高。

2.4 结果分析

从表 3 的结果可知，该工业 γ 射线探伤项目在室内进行探伤作业时，探伤室防护门、操作间防护门、探伤室各侧墙体（东、南、西、北侧）外各测点、控制室操作位处辐射剂量率均与环境本底水平相当，符合根据 GBZ 132-2008 第 11.5 节的中控制水平 $H_1 \leq 2.5 \mu$ Gy/h 的要求^[2]。

作业时，操作室内的周围剂量率与环境本底水平相当。由于探伤室位于公司厂区内，无关人员难以靠近探伤作业区域；而且，当室内探伤作业时，探伤室周围设置有明显的警示标志与工作指示灯，公司内其他无关人员不会靠近该区域。因此可以认为，该项目正常运行时，公众不会受到额外的照射，满足管理要求。

2.5 项目的辐射安全管理

在非作业期间，将贮有放射源的探伤机暂存于公司生产厂区内的专用放射源暂存库，库内设置有专用放射源柜、并具有一定的辐射防护能力。该暂存库由公司实施统一管理，配备有安保人员并实行 24 h 值班制度。暂存库内的门及四周设置有电离辐射警示标志安装有防盗报警系统，库房与铁箱钥匙由专人负责，在管理上做到双人双锁。安全管理部门定期对探伤工作开展情况进行安全监督检查。

在作业期间，工作人员在作业前向公司管理部门申请领取暂存的含源探伤机，办理含源装置的借用手续，做好放射源出入库记录；实行专人专车将探伤机及配套装置；运送至

（下转第 26 页）

2.3 精制 PPCP 清除 DPPH 自由基的能力

由图 3 可知,精制 PPCP 清除 DPPH 自由基的能力与浓度有量效关联,浓度在 1.0 mg/mL~22 mg/mL 之间,DPPH 自由基的清除率从 5.02% 上升到 58.13%,表明精制 PPCP 能有效清除 DPPH 自由基。而 PPCP 浓度从 22 mg/mL 增加到 28 mg/mL 时,DPPH 的清除率已趋于平稳。

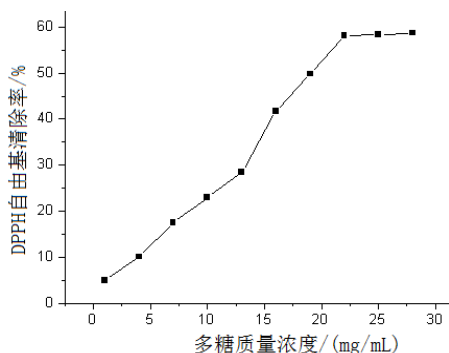


图 3 PPCP 对 DPPH 自由基的清除作用

3 结论

本研究以竹屑为原料经乙酸乙酯回流提取脱脂后,在微波辅助作用下,用纯水提取得粗多糖,粗多糖经活性炭脱色和脱蛋白纯化,得精制多糖 PPCP。精制多糖 PPCP 体外抗氧化研究结果:在精制多糖 PPCP 浓度达到 31 mg/mL 时,对羟·OH 自由基的清除率达到 54% 左右,再增加多糖浓度,清除羟·OH 自由基的能力几乎不变;当精制多糖 PPCP 达到 22 mg/mL 时,对 DPPH 自由基的清除率接近 58%,且不再随多糖浓度的增加,发生明显变化。说明 PPCP 对·OH 自由基和 DPPH 自由基有较好的清除能力。竹屑是竹材加工过程产

生的一种废弃物料,研究竹屑多糖体外抗氧化试验,对废竹屑的开发利用,提高竹资源的综合利用率有积极的作用。

【参考文献】

- [1] 金晓飞,李红,杨欣,等.四种竹沥化学成分分析研究[J].西部中医药,2014(5):13-15.
- [2] 王文渊,张航航,周振华.从竹叶中同步提取多糖、茶多酚和黄酮的研究[J].应用化工,2014(5):835-838,846.
- [3] 潘佳佳,叶胡,丁东栋,等.4种竹子竹叶黄酮质量分数及抗氧化活性的季节变化[J].浙江农业大学学报,2014,31(2):280-284.
- [4] 王文渊,黄文光,唐守勇.超滤分离竹叶中茶多酚的研究[J].食品工业,2011(4):39-42.
- [5] 阳东青,赵美丽,余德润.从竹叶中提取叶绿素[J].江西化工,2008(1):33-35.
- [6] 许子竞,舒群威,罗树常.响应面法优化提取竹屑多糖的工艺研究[J].食品研究与开发,2017,38(9):70-73,117.
- [7] 潘月,雷美玲,吕兆林,等.竹叶多糖分离纯化及抗氧化能力的研究[J].北京林业大学学报,2015(3):148-152.
- [8] 郭静,王浩然,沈周媛,等.3种竹叶抗氧化有效成分分析[J].中成药,2019(11):2688-2694.
- [9] 潘静,杨建琼,欧阳文,等.苦竹叶多糖降血糖作用研究[J].亚太传统医药,2017,13(22):10-12.
- [10] 许子竞,石谦,罗树常.金花茶叶多糖的分离纯化及组成分析[J].天然产物研究与开 2017(29):1148-1153.
- [11] 王杰,刘瑞珍,刘东超,等.槐角多糖抗氧化活性研究[J].食品研究与开发,2020(1):25-29.
- [12] 郭磊,管雨晴,李梅云.慈竹竹叶多糖体外抗氧化作用研究[J].食品研究与开发,2013(16):9-11.
- [13] 潘月,雷美玲,吕兆林,等.竹叶多糖分离纯化及抗氧化能力的研究[J].北京林业大学学报,2015(3):148-152.
- [14] 范三红,任嘉兴,张锦华,等.响应面优化羊肚菌多糖提取工艺及抗氧化性[J].食品工业科技,2019,40(6):179-185,192.

(上接第 10 页)

探伤室后,检查设备状态、连锁装置、警示标志与信号的使用状态;在确认设备及配套设施正常无误后,连接好设备;工作人员穿戴防护用具,佩戴个人剂量计,开启辐射监测仪器;在确认探伤室内无人且东侧、北侧防护门均已关闭时,启动作业信号,输出放射源,开始探伤作业;在作业完成后,使用监测仪器,确保放射源已回到贮源容器内;将探伤机及配套装置安全运回至放射源暂存库,做好入库登记并办理相关手续。

3 结论

通过运行前理论估算,对探伤室的建设提供技术依据。在探伤作业时,在对投入运行后的探伤室及周围环境进行辐射环境监测,通过对监测结果进行分析,表明该探伤室的建设满足辐射防护的安全要求,探伤室的设计参数满足辐射防护的安全要求,验证了上述估算方法适用于工业 γ 射线探伤项目。

按照国家有关标准及规范,探伤室在建设时还设置了连锁装置、紧急停机按钮、警示灯、警示标语等完善的辐射防

护设施,能够在室内 γ 射线探伤作业情况下,防止人员误入。此外,该探伤项目制定有完备的操作规程、实施方案、管理措施,在项目的运行过程中,能够减少放射性职业危害,保护了环境与安全,达到了辐射防护的目的,能够为其他工业 γ 射线探伤项目的建设和安全管理提供重要的借鉴意义^[5,6]。

【参考文献】

- [1] 刘运祚.常用放射性核素衰变纲图[M].北京:原子能出版社,1982.
- [2] GBZ132-2008.工业 γ 射线探伤放射防护标准[S].北京:中华人民共和国国家卫生部,2008.
- [3] 方杰.辐射防护导论[M].北京:原子能出版社,1991.
- [4] 王志煌.新疆某 γ 射线探伤室的屏蔽防护估算研究[J].新疆环境保护,2017,39(3):12-16.
- [5] 张辉雄.核电厂 γ 射线探伤辐射安全管理[J].科技创新与应用,2014(34):267.
- [6] 蒲立星,杨剑,左国勇,等.宁德核电站 γ 射线探伤管理[J].辐射防护通讯,2014(5):17-20.