

# 某钢管厂 X 射线探伤机辐射环境影响分析

张倩 齐彭德 张二勇 张肖恒 周帅

河北奇正环境科技有限公司

DOI: 10.12238/ems.v6i11.10024

**[摘要]** 本文以某钢管厂采用的周向 X 射线探伤机为具体案例, 探讨了 X 射线探伤机运行过程中造成的辐射环境影响, 并进行了环境影响评价过程分析。该评价不仅聚焦于探伤机作业期间产生的直接物理效应, 如 X 射线辐射的剂量分布与屏蔽效果, 还综合考量了其对人员健康安全的潜在影响。并且, 本文为避免企业出现辐射安全事故, 提出了预防措施。最终, 本文旨在为企业优化探伤作业流程、减少环境污染、保障员工及公众健康提供理论依据与实践指导。

**[关键词]** X 射线探伤机, 辐射剂量率

## Analysis of Radiation Environmental Impact of X-ray Flaw Detection Machine in a Steel Pipe Factory

Zhang Qian, Qi Pengde, Zhang Eryong, Zhang Xiaoheng, Zhou Shuai

Hebei Qizheng Environmental Technology Co., Ltd

**[Abstract]** This article takes the circumferential X-ray flaw detector used in a steel pipe factory as a specific case, explores the radiation environmental impact caused by the operation of the X-ray flaw detector, and analyzes the environmental impact assessment process. This evaluation not only focuses on the direct physical effects generated during the operation of the flaw detector, such as the dose distribution and shielding effect of X-ray radiation, but also comprehensively considers its potential impact on personnel health and safety. Moreover, this article proposes preventive measures to prevent radiation safety accidents in enterprises. Ultimately, this article aims to provide theoretical basis and practical guidance for enterprises to optimize the inspection process, reduce environmental pollution, and ensure the health of employees and the public.

**[Keywords]** X-ray flaw detector, radiation dose rate

### 1、前言

X 射线探伤机是一种常见的无损检测探伤方法, 广泛应用于机械、化工、高压容器等各种行业产品的无损检测, 其可以确定产品裂纹、气孔、焊接不良等内部缺陷, 但探伤过程中产生的 X 射线将增加从业人员和周围环境的辐射剂量。因此, 本文以某钢管厂周向 X 探伤机为例, 对其辐射环境影

响评价要点进行分析, 为利用 X 射线进行探伤类建设项目进行辐射环境影响评价提供参考。

### 2、评价标准

本文评价标准包含分年剂量管理目标值、周剂量参考控制值和探伤室外的参考控制水平, 详见表 1。

表 1 评价标准

类别	执行标准	标准值	本项目
年剂量管理目标值	职业工作人员	《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》	20mSv/a
	公众人员	(GB18871-2002) <sup>[1]</sup>	1mSv/a
周剂量参考控制值	职业工作人员	《工业探伤放射防护标准》(GBZ117-2022) <sup>[2]</sup>	100 μSv/周
	公众人员		5 μSv/周
探伤室外 30cm 处	探伤室屏蔽墙及防护门外		2.5 μSv/h

	探伤室顶外表面		100 μ Sv/h	100 μ Sv/h
--	---------	--	---------------	---------------

3、工程分析

3.1 设备简介

(1) 探伤机的组成和工作原理

工业 X 射线探伤机由 X 射线管和高压电源组成，核心部件是 X 射线管。X 射线管包含有阳极和阴极两个电极，分别为用于接受电子轰击的靶材和发射电子的灯丝，两极均被密封在高真空的玻璃或陶瓷外壳内。阴极通常是钨制灯丝，阳极靶则根据应用的需要，由不同材料制成各种形状，一般采用高原子序数的难熔金属如钨、铂、金等制成。当钨丝通过足够的电流使其产生电子云，且有足够的电压加在阳极和阴极间，使得电子云被拉往阳极，电子以高能高速的状态撞击靶面，高速电子到达靶面，运动突然受到阻止，其动能部分转化为辐射能，以 X 射线的形式放出。

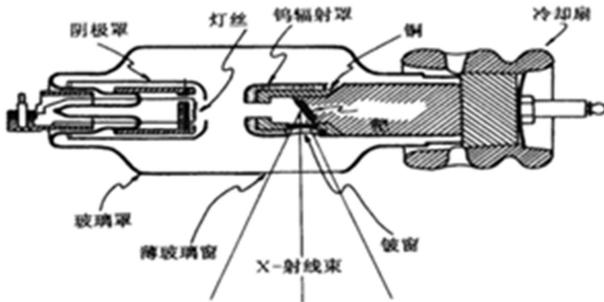


图 1 典型 X 射线管结构

(2) 探伤机参数

公司使用 X 射线探伤机型号及参数如下表所示。

表 2 公司 X 射线探伤机主要技术参数

名称	X 射线探伤机
类别	II 类
最大管电压 (kV)	300
最大管电流 (mA)	5.0
照射方向	周向
有用线束方向	东西
辐射角	360° × 25°
过滤条件	3mm 铝
距辐射源点 (靶点) 1m 处的输出量, μSv · m <sup>2</sup> / (mA · h)	20.9 × 6 × 10 <sup>4</sup>

3.2 屏蔽防护措施

公司探伤室屏蔽防护措施如下：

曝光室：室内净长（南北）13.4m，净宽（东西）8.4m，净高 5.4m。

四周墙：墙壁为钢筋混凝土结构，厚度均为 0.8m。

大防护门（工件进出口）：门体高 4.8m，宽 4.6m，厚 25cm，铅、硫酸钡、钢复合结构，152mm 硫酸钡、10mm 铅板和 5mm 钢板，门洞高 4m，宽 4m，上、下、左、右与四周墙壁的搭接

量分别为 40cm、40cm、30cm、30cm。

小防护门：门体高 2.7m，宽 1.5m，厚 15cm，铅、硫酸钡、钢复合结构，52mm 硫酸钡、10mm 铅板和 5mm 钢板，门洞高 2.1m，宽 0.9m，上、下、左、右与四周墙壁的搭接量分别为 30cm、30cm、30cm、30cm。

大防护门设计有声光报警器、工作指示灯及电离辐射标志，大小防护门均设计有门机连锁装置。

探伤室内安装有摄像装置，操作台上安装有监视器，全面、全过程监视曝光检测过程，一旦发生意外，探伤工作人员可以立即终止操作作业，曝光室内设置紧急停机按钮，一旦出现人员误入曝光室，可通过紧急停机按钮终止操作作业。

探伤时，通过轨道将工件送入曝光室，采用 X 射线探伤机对工件不同部位进行探伤。

探伤工艺流程主要有：放置固定好探伤工件、待检工件准备、人员撤离并关闭铅防护门、设置电压和曝光时间、调整焦距、曝光、关机。

- (1) 将准备接受无损探伤的工件移动至曝光室内；
- (2) 将 X 射线探伤机的“管电流调节”、“管电压调节”旋钮逆时针转到初始极限位置（最小管电压和管电流）；
- (3) 在工件上的待检测部位贴好胶片，对准位置，调好焦距；
- (4) 探伤工作人员确认曝光室内无人逗留后，关闭曝光室的防护门，撤离曝光室，回到操作室；
- (5) 在计时器上选取所需要的曝光时间，按 X 射线探伤机操作规程开启探伤机，开始对工件进行无损检测；
- (6) 曝光时间结束，X 射线探伤机自动降压至最低值并切断高压，工作结束；
- (7) 对胶片进行洗片和评片，出具检测报告。

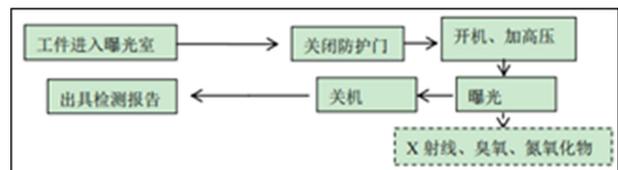


图 2 X 射线探伤机工作流程示意图

同时，根据 GB18871-2002 中要求，将探伤室划分为监督区和控制区，其中，将需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，严格限制非工作人员进入；监督区指虽然需要经常对照射条件进行监测和评价、但是不需要采取专门的防护手段和安全措施的区域，需要限制无关人员进入。

公司探伤室平面布置图及分区管理图见图 3（图中红色为控制区，蓝色为监督区）。

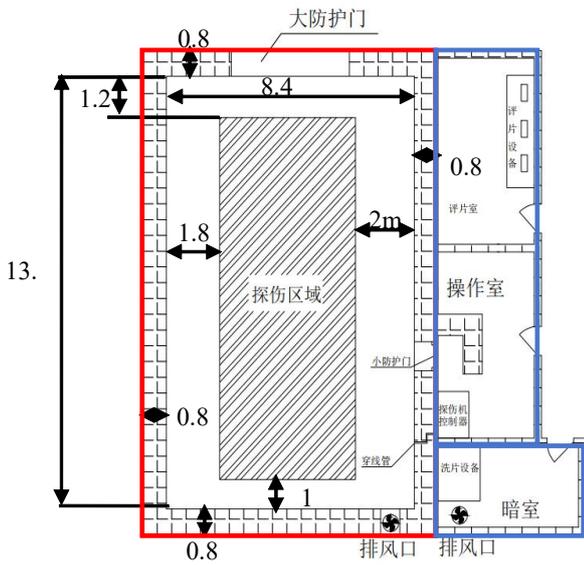


图3 探伤室平面布置图

3.3 安全措施

(1) 探伤室应设置门-机联锁装置, 应在门(包括人员进出门和探伤工件进出门)关闭后才能进行探伤作业。门-机联锁装置的设置应方便探伤室内部的人员在紧急情况下离开探伤室。在探伤过程中, 防护门被意外打开时, 应能立刻停止出束或回源。

(2) 曝光室门口和内部同时设有显示“预备”和“照射”状态的指示灯和声音提示装置。“预备”信号可持续足够长的时间, 以确保探伤室内人员安全离开。探伤室内、外醒目位置处设有清晰的对“预备”和“照射”信号意义的说明。“预备”信号和“照射”信号应区别显著、以免混淆, 同时也应与其他报警信号具有显著不同。

(3) 探伤室设有紧急停机按钮, 一旦出现人员误入曝光室或误开机、出现紧急事故时, 可以立即停机、停止照射。

(4) 曝光室内部安装摄像装置, 做到探伤室无死角。操作台上安装有监视器, 可全面、全过程监视曝光检测过程, 一旦发现意外, 探伤工作人员可以立即终止操作作业。

(5) 曝光室的大防护门、小防护门明显位置均粘贴警告标识及中文警示说明, 提示当心电离辐射, 注意安全, 避免无关人员误入探伤室。

(6) 曝光室内设置通风装置, 排风管道布置在探伤室南侧, 风口未朝向人口密集区域, 换气次数3次/h。

3.4 影响分析

X射线探伤机射线管辐射角度为 $25^\circ$ , 则有用线束半张角为 $12.5^\circ$ , 当探伤机周向照射时,  $\tan 12.5^\circ \times 1.8\text{m} = 0.40\text{m} < 1.0\text{m}$ , 因此有用线束不直接照射南墙和北墙(大防护门), 南墙和北墙(大防护门)仅受到泄露辐射照射和散射辐射照射。因此重点关注防护有用线束照射的西墙、东墙和室顶, 防护泄露辐射和散射辐射的南墙、北墙(大防护门)。

3.4.1 探伤室外30cm处剂量率估算

(1) 初级射线剂量率估算

根据《工业X射线探伤室辐射屏蔽规范》(GBZ/T250-2014)中3.2.1, 有用线束的整个墙面均考虑有用线束屏蔽, 不需考虑进入有用线束区的散射辐射<sup>[3]</sup>。有用线束屏蔽估算公示如下:

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

式中:

H: 关注点的剂量率,  $\mu\text{Sv/h}$ ;

I: X射线机探伤装置在最高管电压下的常用最大管电流, 单位为毫安(mA);

$H_0$ : 距辐射源点(靶点)1m处的输出量,  $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$ , 以  $\text{mSv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{min})$  为单位的值乘以  $6 \times 10^4$ , 见 GBZ/T250-2014 中附录表 B.1;

B: 屏蔽透射因子; 由附录 B.1 曲线查出相应的屏蔽透射因子 B。

R: 辐射源点(靶点)至关注点的距离, 单位为米(m)。

表3 主射束所致曝光室屏蔽墙外剂量率计算参数及结果

关注点	I, mA	$H_0, \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$	B	R, m	H, $\mu\text{Sv/h}$
东墙外 30cm 处	5	$20.9 \times 6 \times 10^4$	$10^{-6}$	3.1	0.65
西墙外 30cm 处	5	$20.9 \times 6 \times 10^4$	$10^{-6}$	2.9	0.75
室顶外 30cm 处	5	$20.9 \times 6 \times 10^4$	$10^{-6}$	4.5	0.31

(2) 漏射射线剂量率估算

漏射射线剂量率按照下式估算:

$$H = \frac{B \cdot H_L}{R^2}$$

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

式中:

H: 射线的剂量率,  $\mu\text{Sv/h}$ ;

$H_L$ : 距靶点 1m 处 X 射线管组装体的泄漏辐射剂量率,  $\mu\text{Sv/h}$ ;

X: 屏蔽物质厚度, mm;

B: 屏蔽透射因子;

TVL: 什值层厚度, cm, 参考 GBZ/T250-2014 中附录表 B.2;

R: 计算点到 X 射线机的距离, m。

经计算, 各关注点的漏射剂量率如下。

表4 泄漏辐射所致曝光室墙外剂量率计算参数选取与计算结果

关注点	X, mm	TVL, mm	B	$H_L, \mu\text{Sv/h}$	R, m	H, $\mu\text{Sv/h}$
南墙外 30cm 处	800	100	$1.00\text{E}-08$	$5 \times 10^3$	2.1	$1.13\text{E}-05$
北墙(大防护门)外 30cm 处	73.75	5.7	$1.15\text{E}-13$	$5 \times 10^3$	2.3	$1.09\text{E}-10$

(3) 散射射线剂量率估算

散射射线剂量率按照下式估算:

$$H = \frac{I \cdot B \cdot H_0}{R_s^2} \cdot \frac{F \cdot \alpha}{R_0^2}$$

$$B = 10^{-X/TVL}$$

式中:

I: X射线机探伤装置在最高管电压下的常用最大管电流, 单位为毫安 (mA), 本项目为 5mA;

H<sub>0</sub>: 距辐射源点(靶点)1m 处的输出量, μSv · m<sup>2</sup> / (mA · h), 以 mSv · m<sup>2</sup> / (mA · min) 为单位的值乘以 6 × 10<sup>4</sup>, 见 GBZ/T25

0-2014 中附表 B.1;

B: 屏蔽透射因子。按照 GBZ/T250-2014 中表 2 并查附录 B 表 B.1 的相应值, 确定 90° 散射辐射的 TVL 为 86mm。

F: R<sub>0</sub> 处的辐射野面积, m<sup>2</sup>;

α: 散射因子, 入射辐射被单位面积 (1m<sup>2</sup>) 散射体散射到距其 1m 处的散射辐射剂量率与该面积上的入射辐射剂量率的比。与散射物质有关, 在未获得相应物质的 α 值保守估计, 见附录 B 中 B.4.2 R<sub>0</sub><sup>2</sup>/F · α = 50;

R<sub>0</sub>: 辐射源点(靶点)至探伤工件的距离, m;

R<sub>s</sub>: 散射体至关注点的距离, m。

经计算, 各关注点的散射剂量率如下。

表 5 散漏辐射所致曝光室墙外剂量率计算参数选取与计算结果

关注点	X, mm	TVL, mm	B	I, mA	H <sub>0</sub> , μSv · m <sup>2</sup> / (mA · h)	R <sub>s</sub> , m	F · α / R <sub>0</sub> <sup>2</sup>	H, μSv/h
南墙外 30cm 处	800	86	4.99E-10	5	20.9 × 6 × 10 <sup>4</sup>	2.1	0.02	1.42E-05
北墙(大防护门)外 30cm 处	73.75	1.4	2.10E-53	5	20.9 × 6 × 10 <sup>4</sup>	2.3	0.02	4.97E-49

(4) 曝光室屏蔽墙外各关注点剂量率

根据上述计算得曝光室屏蔽墙外各关注点的剂量率如表 5 所示。

表 5 探伤室屏蔽墙外剂量率 μSv/h

关注点位置	剂量率	标准值
东墙外 30cm 处	0.65	2.5
西墙外 30cm 处	0.75	
室顶外 30cm 处	0.31	
南墙外表面 30cm 处	2.55E-05	
北墙(大防护门)外表面 30cm 处	1.09E-10	
东墙外表面 30cm 处	0.65	
西墙外表面 30cm 处	0.75	
室顶外表面 30cm 处	0.31	

3.4.2 辐射工作人员和公众剂量计算

辐射工作人员和周围公众年有效剂量预测可通过 GBZ/T 250-2014 中的公式计算:

$$H = \dot{H} \cdot t \cdot U \cdot T$$

式中:

H: 年剂量, μSv/年;

H: 参考点处剂量率, μSv/h;

U: 使用因子, U 取 1;

T: 居留因子;

T: 照射时间, h。项目年拍摄胶片 20000 张, 每张胶片照射时间约 3min, 则年照射时间为 1000h, 周照射时间为 19.2h。

经计算得, 职业操作人员的周有效剂量和年有效剂量分别为 14.1 μSv 和 0.75mSv/a, 公众人员的周有效剂量和年有效剂量分别为 0.001 μSv 和 0.006 μSv。

3.5 辐射防护措施

经计算得探伤室外 30cm 处剂量率和职业操作人员、公众

人员的周有效剂量和年有效剂量均符合相关标准限值要求。

3.6 预防措施

为了避免辐射事故的发生, 建设单位应严格执行以下预防措施:

(1) 照射事故的发生只是暂时的, 一旦发生照射事故, 将立即采取停机措施, 停机后辐射污染亦将消失。但需要在发生事故后, 对受到射线照射人员所受到的辐射剂量进行检测, 必要时及时就医, 以保障人员健康。

(2) 为避免事故的发生, 定期对探伤装置防护措施的有效性进行检查, 定期安排监测, 并严格落实各项规章制度。

(3) 严格按照探伤机的操作流程进行操作, 严禁违规操作。从事探伤操作的人员必须取得从业资格证, 并且操作时同时在场工作人员应不少于 2 人。

(4) 每月对使用探伤机的安全装置进行维护、保养, 对可能引起的操作失灵的关键零配件定期进行更换。

(5) 加强对探伤操作人员的培训, 持证上岗。

4、结语

公司探伤室屏蔽材料及厚度能够满足防护要求, 探伤室外 30cm 处剂量率和职业操作人员、公众人员的周有效剂量和年有效剂量均符合相关标准限值要求。因此, 在严格遵守防护要求的前提下, 项目造成的辐射环境影响是可接受的, 项目是可行的。

[参考文献]

[1]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, 2002。

[2]GBZ 117-2022, 工业探伤放射防护标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022。

[3]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。

作者简介: 张倩, 1993-, 汉族, 河北省衡水市, 汉族, 中级工程师, 硕士研究生、研究方向为环境影响评价。