



核技术应用-工业部分

中国辐射防护研究院

保健物理与核安全研究所

李国强

联系方式: ligq168@yahoo.com.cn ; 13099097485



内 容

第一部分：工业辐照装置的防护与安全

第二部分：核子仪与放射性测井的辐射安全与防护

第三部分：工业射线探伤辐射安全与防护



第一部分：工业辐照装置的防护与安全



工业辐照的定义

工业辐照，又称辐射加工，是指利用电离辐射与物质相互作用产生的物理效应、化学效应和生物效应，对物质和材料进行加工处理的一种核技术。辐射加工通常包括 γ 辐射加工和电子加速器辐射加工。



工业辐照所用的辐射源

辐射源是指可以通过发射电离辐射或释放放射性物质而引起辐射的一切物质或实体。常见的辐射源有：放射性核素，加速器辐射源，核反应堆等。工业辐照的辐射源可以分为两大类：

- (1) γ 辐射源，包括钴—60和铯—137。
- (2) 加速器辐射源，包括电子束和X射线。



γ辐射源

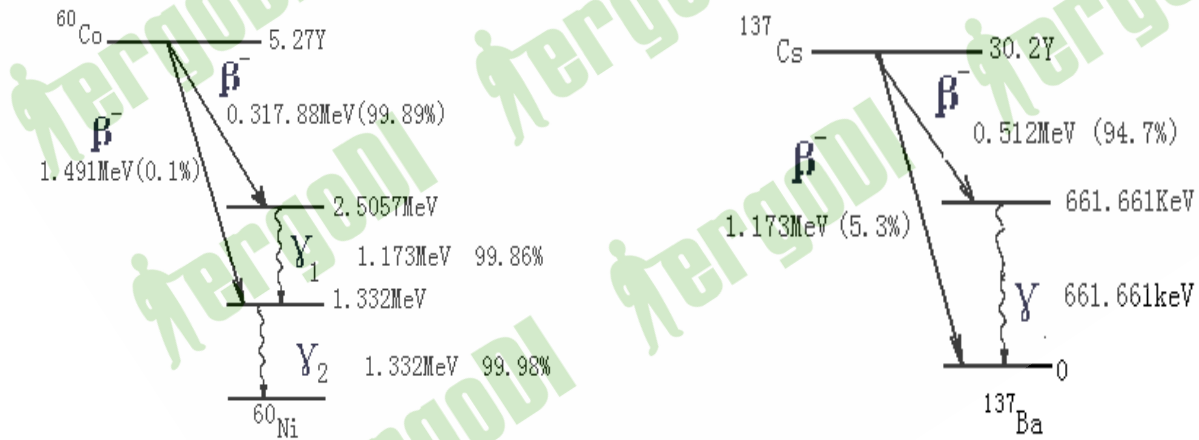


图1.1 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 的衰变纲图



电子束辐射源

能量	能量范围	束功率	主要机型	束流形式	主要用途
低	0.15-0.3MeV	几kW -100kW	电子帘加速器	连续束	涂层固化, 细线、薄膜、片状物的辐照, 烟气脱硫和污水处理等
中	0.3-3 MeV	几十kW -400kW	高频高压加速器 (地那米); 高压变压器型加速器	连续束	电线电缆的聚乙烯绝缘材料和聚乙烯发泡塑料的辐射交联, 橡胶硫化; 辐照生产高强度耐温聚乙烯热缩管等
高	3-10 MeV	几kW -几百kW	电子直线加速器; 梅花瓣型加速器	脉冲	医疗用品的辐射消毒, 食品保藏, 电子元器件改性, 材料改性等方面等

图1.2 工业辐照常用的电子加速器



辐照装置的应用领域

- 医疗产品的消毒 (如注射器等)
- 血液制品的消毒
- 药物产品的消毒
- 食品保鲜 (调味品等)
- 杀虫
- 聚合物材料的合成
- 用于研究目的的细胞培养的辐照



国际 γ 辐照装置的现状

据不完全统计，全世界（中国除外）现有大型钴源辐照装置**250**余座，实际装源超过**3**亿居里，根据美国核管理委员会（**NRC**）在**2007**年的统计数据 displays，美国现有钴源总强度到达**1.98**亿居里。美国已设计建造了单座装源能力超过 **3.7×10^{17} Bq** (**1000**万居里) 的大型辐射灭菌装置。



中国辐照装置现状

我国共有各类 γ 辐照装置近**200**座,设计装源能力**30**万居里以上 γ 辐照装置**101**座,在建**10**余座,设计装源能力低于**30**万居里的小型钴源辐照装置**80**多座。累计设计装源能力超过**1**亿居里,实际装源活度已经超过**4000**万居里。



γ 辐照装置的分类原则

- 1、国际原子能机构安全丛书 No.107 “ γ 射线和电子束辐照装置的辐射安全”（2006版）
- 2、GB 17568-2008 《 γ 辐照装置设计、建造和使用规范》

根据辐照装置的设计，尤其是放射源的出入口控制和屏蔽，将 γ 辐照装置分成以下四类：



辐照装置的类型

伽玛辐照装置

采用钴-60、铯-137等放射源

单枚或多枚放射源

总的源活度 从几个 TBq（几百居里） 到超过 100 PBq
(几百万居里)



第 I 类 自屏蔽干法贮源辐照装置（血液辐照器）

其放射源：

- 完全密封于由固体材料制造的干式容器中；
- 在任何时间都被屏蔽； 放射源使用时也不离开屏蔽容器；
- 结构设计使得人身体不可能进入密封源和正在进行辐照的空间。



自屏蔽干法贮源辐照装置





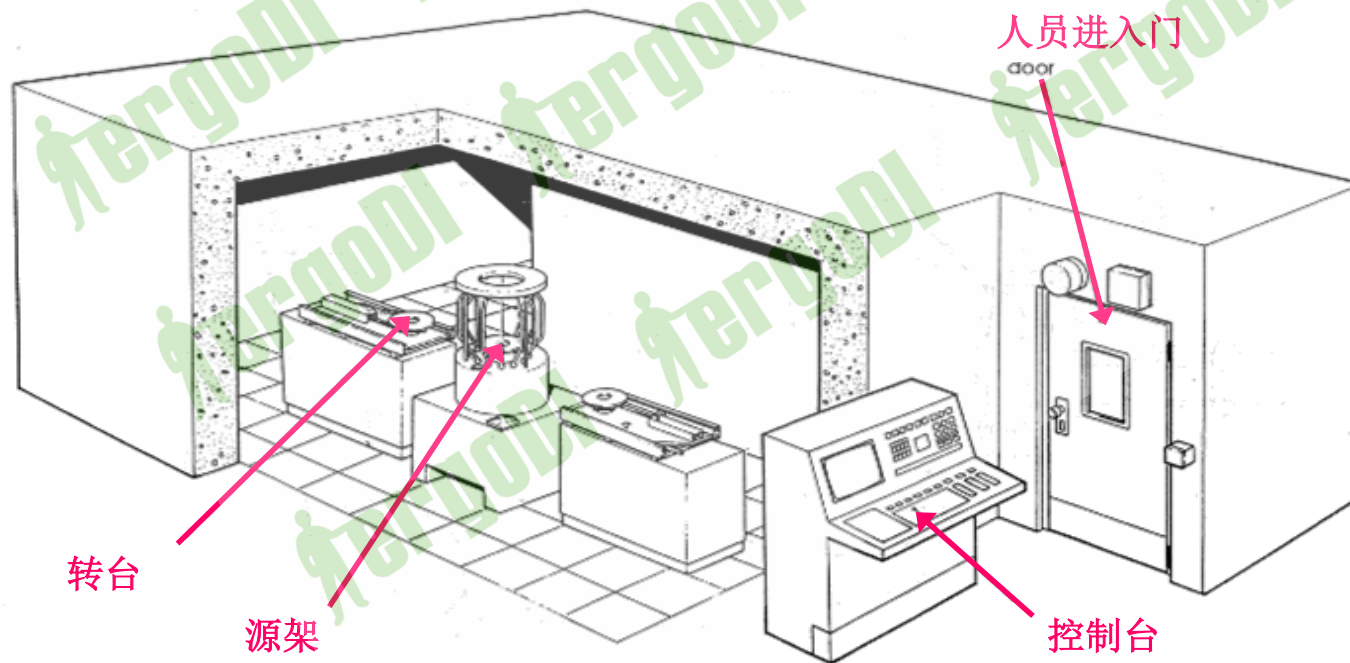
第 II 类 固定源室干法贮源 γ 辐照装置 (干法贮源)

受控人员可进入的辐照设施，其中的密封源是：

- 密封于由**固体材料**制造的干式容器中；
- **不使用时**是完全屏蔽的；
- 使用时源离开屏蔽容器，**裸露**在辐照室中；
- **人员进入**辐照室需要严格控制；
- 照射是在辐照室中进行的，而辐照室通过入口控制系统保证在照射时人员不能进入。



固定源室干法贮源辐照装置

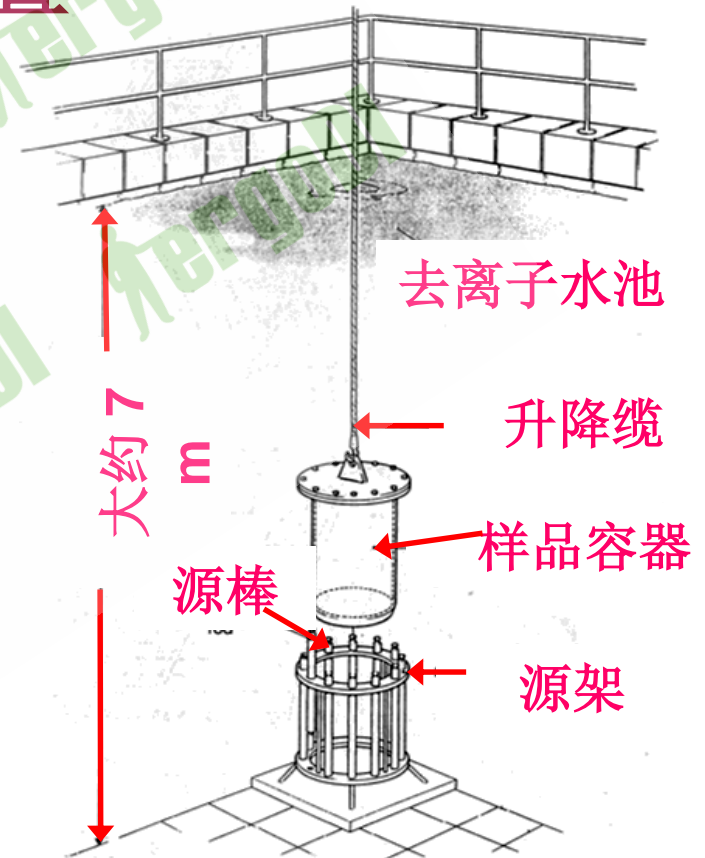




第 III 类 湿法贮源水下辐照装置

一种辐照装置，其中的密封源是：

- 存放在贮源水井中（安全位），
- 使用时被辐照的物品移到水下某一位置（辐照位）；
- 在任何时候都是密封的；
- 结构设计和正确的使用方式使得人员进入密封源和正在进行辐照的空间受到限制。





第 IV 类 固定源室湿法贮源 γ 辐照装置

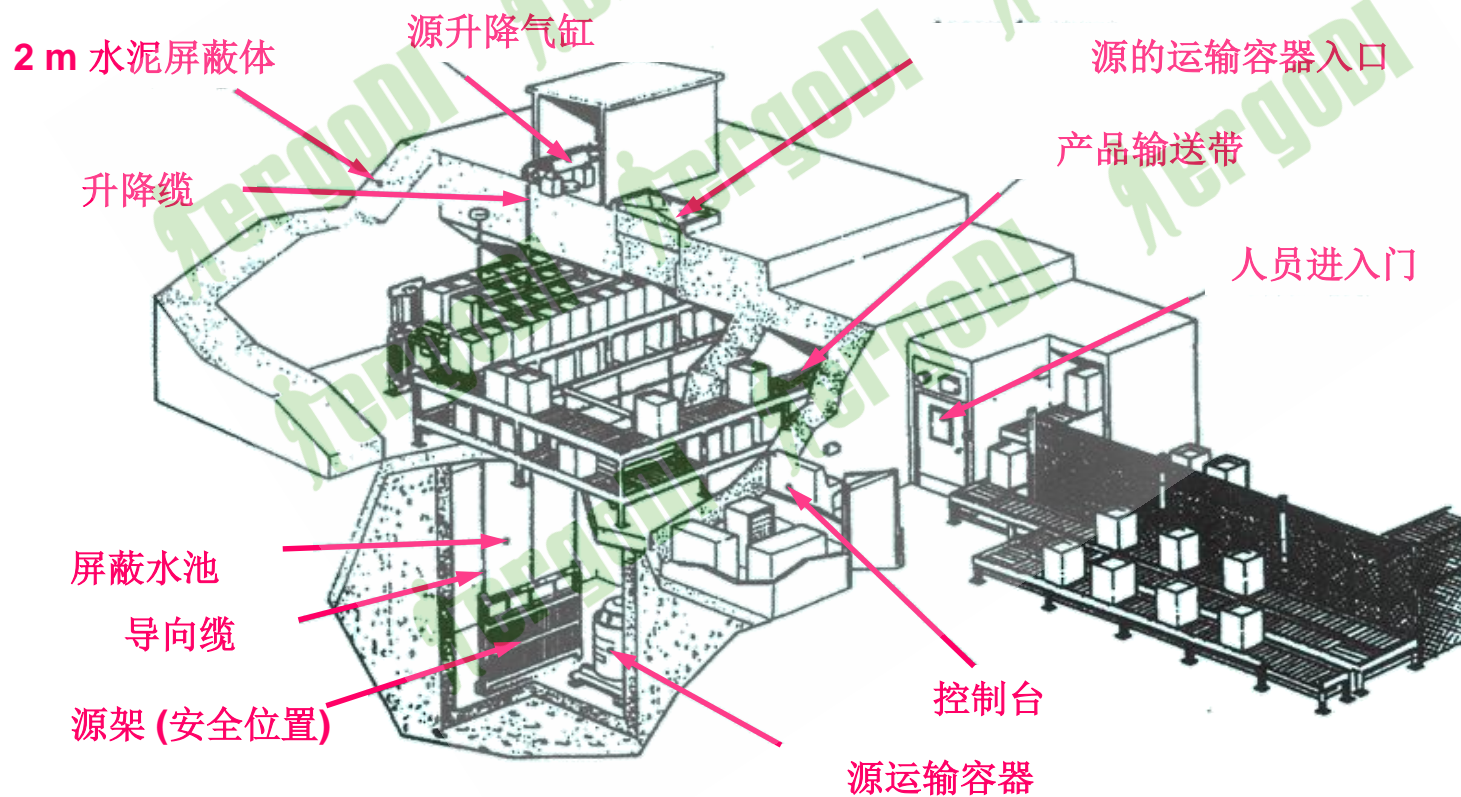
人员进入受到控制的辐照设施，其中的密封源是：

- 存放在一个贮源水井中（安全位）；
- 使用时提升至地面上某一位置（辐照位）；
- 不使用时是完全屏蔽的；
- 被辐照的物品通过传输装置送进辐照室
- 源在辐照位置时，采取安全联锁措施，防止人员误入辐照室。

[国际原子能机构安全丛书 107]



固定源室湿法贮源 γ 辐照装置





IV类伽玛辐照装置



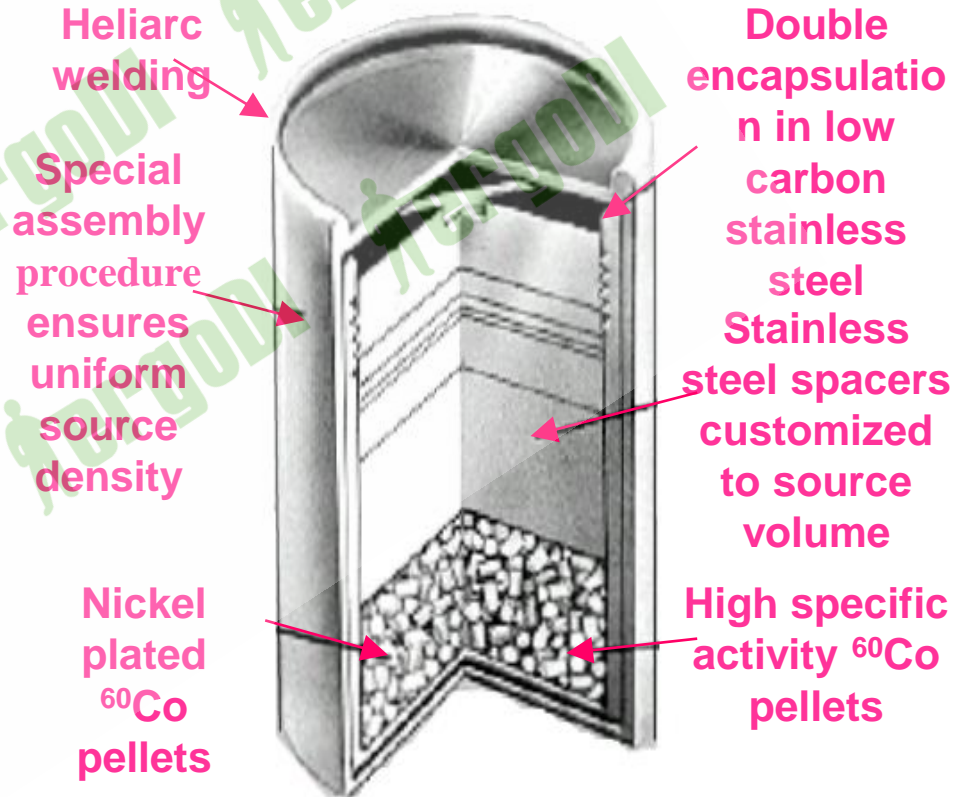


γ 辐照装置的组成

- 辐射源
- 源架及其操作系统
- 屏蔽防护系统
- 辐照货物运输系统（略）
- 控制系统
- 剂量系统
- 安全联锁系统
- 通风系统
- 水处理系统



γ 辐射源





放射源的分类

核素名称	I类源 (Bq)	II类源 (Bq)	III类源 (Bq)	IV类源 (Bq)	V类源 (Bq)
^{60}Co	$\geq 3 \times 10^{13}$	$\geq 3 \times 10^{11}$	$\geq 3 \times 10^{10}$	$\geq 3 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^5$
^{137}Cs	$\geq 1 \times 10^{14}$	$\geq 1 \times 10^{12}$	$\geq 1 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^4$



放射源的贮存

放射源在辐照室内的贮存方式有干法和湿法两种。干法贮源是在辐照室设置干式贮源井或贮源铅容器，放射源在非照射状态时退到井下或容器内。现在一般都采用湿法贮源，即在辐照室内设一个深水井，让放射源在非照射状态时降入装满去离子水的水井底部的安全位置，当工作时被将其提升到地面上的工作位置。



源架

源架是为盛载和布置放射源以形成特定辐射场的专用设备，一般由不锈钢材料制造。

对源架的基本要求：（1）放射源能安全可靠地装载在源架上；（2）放射源的装卸方便；（3）保证放射源不受机械损伤；（4）提出水面后能迅速排空积水；（5）源架的容量应该按装置最大装源能力设计，并要适当的考虑每年的补充量；（6）为了保护源架的安全，应设有防止辐照物碰撞的保护装置。



常用的源架类型:

- (1) 线源
- (2) 筒状源
- (3) 单板源
- (4) 双板源



筒心源架



单板源架



源升降系统

源架的升降通常是用钢丝绳通过滑轮引出辐照室，由升降操作系统在辐照室外完成的。源升降机具有以下功能：（1）源架在井下存放位置和井上工作位置的定位；（2）给出源架位置的指示；（3）驱动系统的过力矩保护；（4）断电自动降源；（5）源架迫降；（6）建立以升降源为中心的安全联锁。

源架升降系统按驱动方式分为电动、液压和气动三种类型。目前采用气动及液压驱动较多。



屏蔽防护系统

- 辐照室主防护墙的屏蔽设计
- 辐照室迷道的屏蔽设计
- 辐照室屋顶的屏蔽设计
- 贮源水井深度
- 屏蔽防护门的厚度

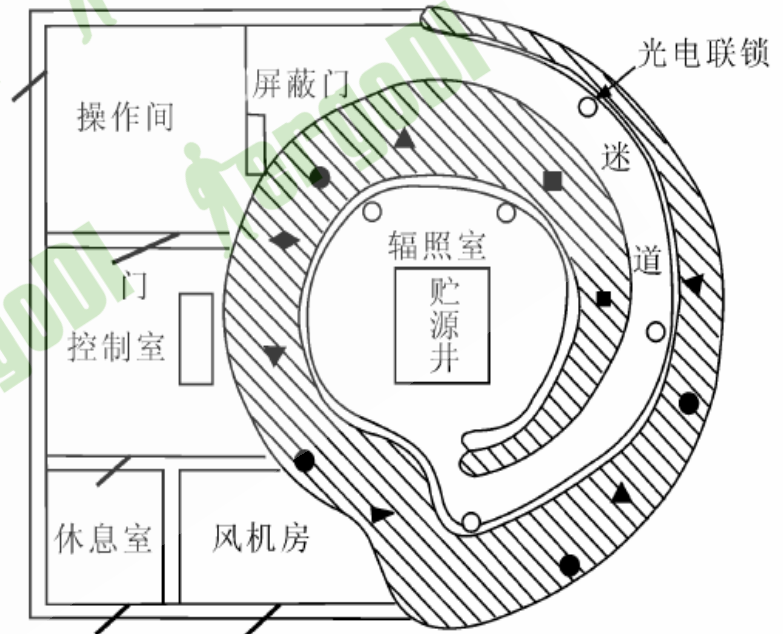


图1 ^{60}Co 辐照站平面示意图



控制系统

- (1) 放射源升降的控制
- (2) 产品传输系统的控制
- (3) 辐照室门的控制
- (4) 进、排风机的远距离控制
- (5) 信号系统和智能语音报警系统
- (6) 数据管理和监控系统



控制台





状态指示器

条件	颜色
紧急情况 (停止按钮 或 光)	红色
警告 - 危险	或红色
紧急信息 (辐照装置故障)	红色
注意 (非紧急情况, 需要知道一些功能在启动)	黄色或橙色
正常 (辐照装置没用使用, 或者功能安全)	绿色
信息	蓝色



安全联锁系统

γ 辐照装置必须设有功能齐全、性能可靠的安全联锁系统，特别对人员和货物出入口、源架操作系统、货物传输系统等进行有效的监控和联锁。安全联锁系统由物理器件、机械或电器设施组成，并依赖自动控制系统的联锁设计实现。



剂量系统

➤ 辐射安全剂量监测

① 辐照工作场所的剂量监测

② 工作人员的个人剂量监测

③ 贮源井水和钴源运输容器放射性污染的监测

➤ 辐照室内剂量场的测定

➤ 辐照产品吸收剂量的测量



通风系统

- 辐解过程会产生臭氧、氮氧化物以及其它的有毒气体。需要采取措施防止人员暴露于超过相关审管部门规定的浓度限值的有毒气体中。
- 通常采用能使辐照室中产生负压的通风系统。
- 连续地测量空气流，一旦该系统失效，则将自动终止辐射。通常应用时间延迟联锁装置。



水处理系统

现在绝大多数 γ 辐照装置采用湿法贮源系统。贮源水井基础用防水混凝土制造，内衬不锈钢覆面。为了避免水中的杂质腐蚀放射源，贮源井水要使用去离子水或蒸馏水。水质要求：

电导率：1~10 μ S/cm

pH值：5.5~8.5

氯（Cl⁻）离子： \leq 1ppm



电子束辐照设施的分类

国际原子能机构 安全丛书107 将电子束辐照设施分为两类。

I 类电子束辐照装置（自屏蔽型）

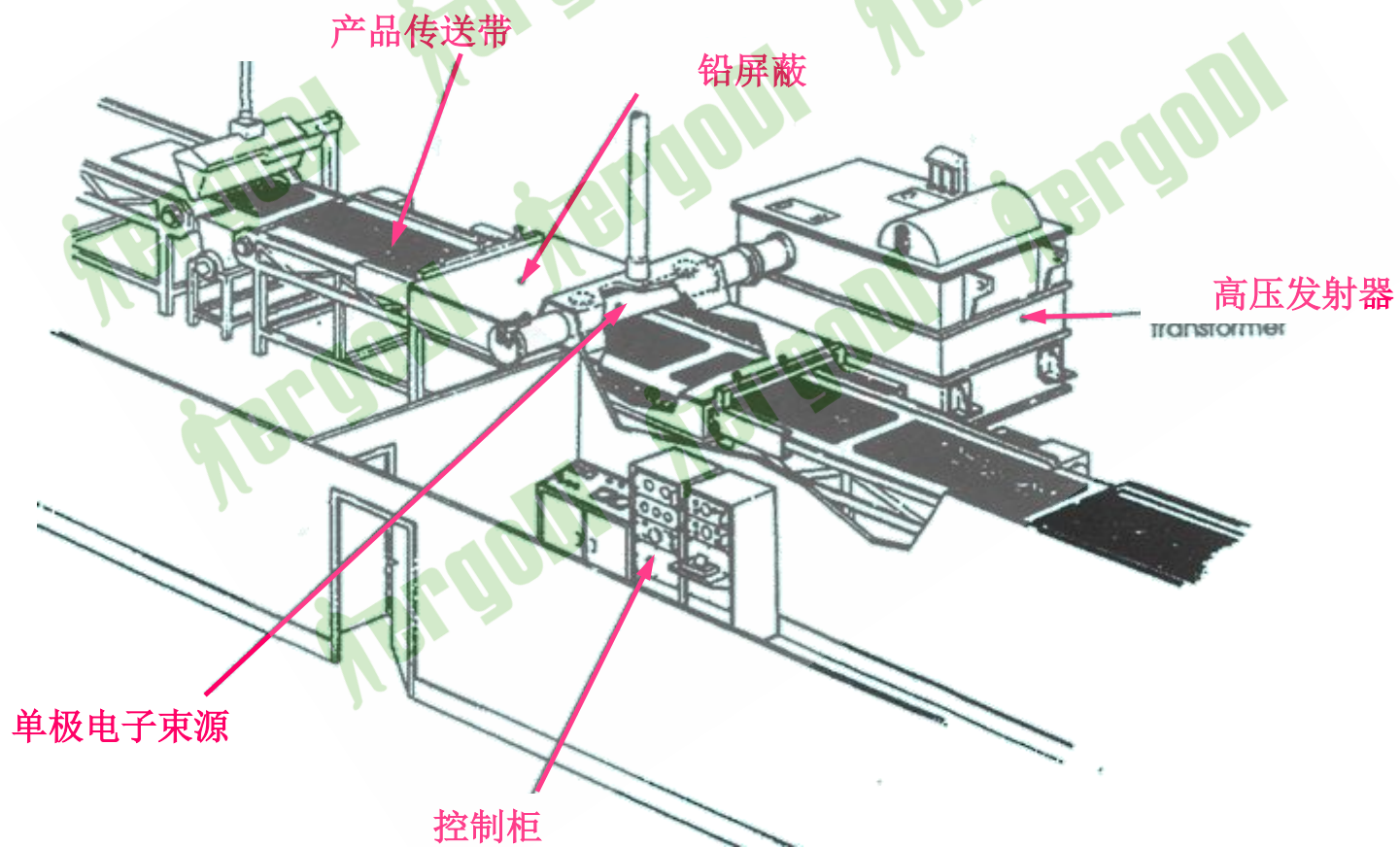
带有完整的、封闭的屏蔽系统，运行时，人员不能接触主射线束，人员进入辐照室不需要受控

II 类电子束辐照装置（无自屏蔽型）

自身没有屏蔽系统，依靠辐照室墙壁屏蔽，辐照室入口门采取安全联锁措施，防止运行时人员误入

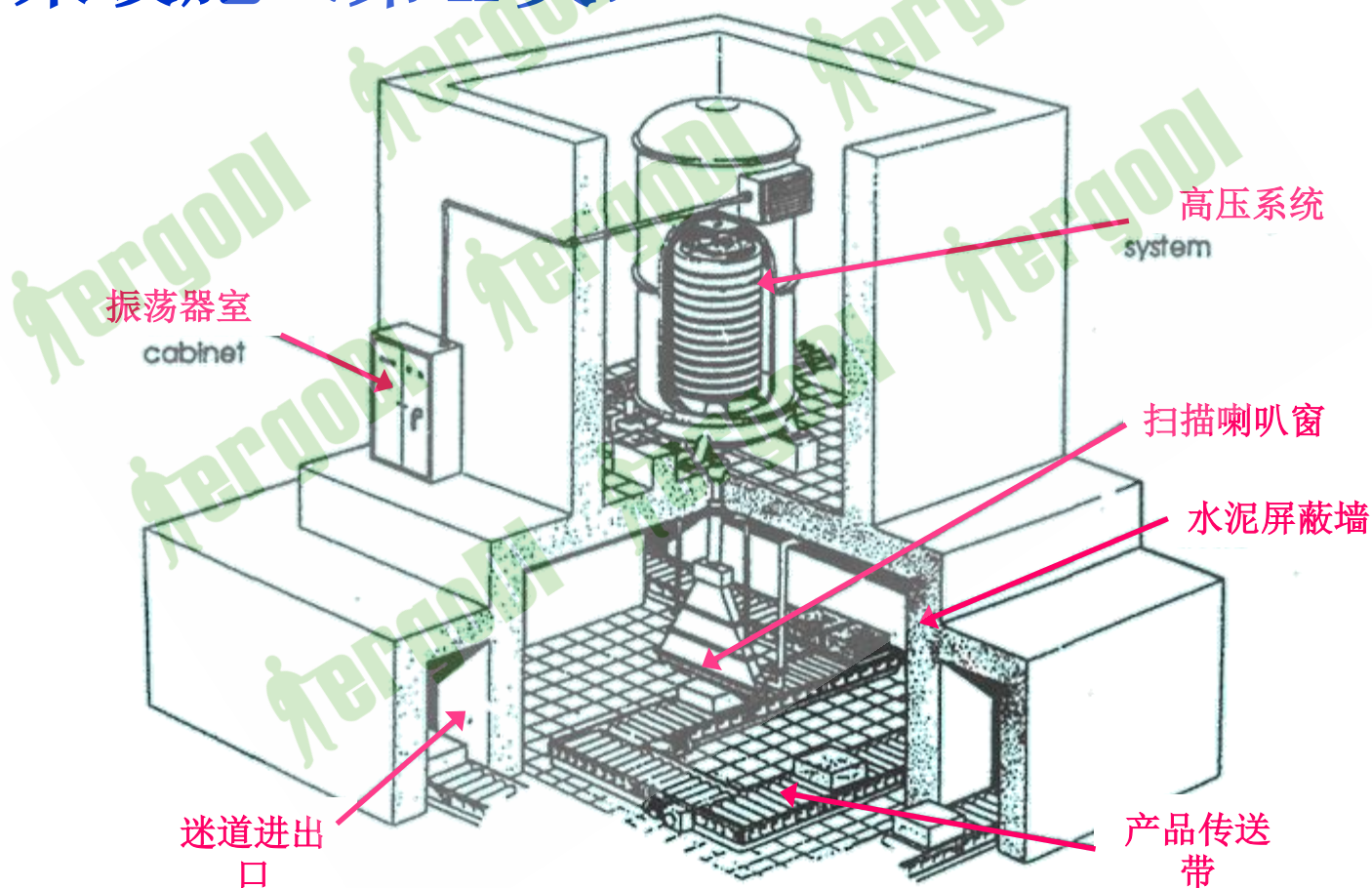


电子束设施（第 I 类）





电子束设施（第II类）





电子加速器的组成

- 加速器主体系统（电子枪、加速管等）
- 高压系统
- 电子束流引出系统
- 控制系统
- 安全联锁系统
- 辅助系统（束下装置、冷却系统、真空系统、绝缘气体）



控制系统

- 1). 加速器自动操作控制。操作加速器必须按先后次序操作，若发生误操作，联锁保护系统就立即起作用。
- 2). 在加速器运行中连续诊断、测试和随时调整加速管内的真空度、加速器高压、引出窗膜温度等加速器运行参数，自动控制设定值。
- 3). 稳定地自动控制和调节电子束流、电子能量、束流斑点尺寸、扫描在窗膜上的位置等加速器性能参数。
- 4). 加速器的运行状态与束下装置的运行状态自动同步。
- 5). 对加速器运行状态远程诊断和巡检。



安全联锁系统

电子加速器的安全联锁系统基本类似 γ 辐照装置：

- ✓ 加速器和靶厅的门必须装安全联锁装置，只有门关闭后才能产生辐射。
- ✓ 产生辐射的控制系统应该用开关钥匙控制。
- ✓ 在加速器厅、靶厅内工作人员易达到的地点，应设置紧急停机或断束开关。这种开关应有醒目的标志。
- ✓ 在通经辐射区的通路上，出入口和控制台上须安装工作状态指示灯，而在加速器厅和靶厅内醒目的地方装闪光式或旋转式红色警告灯及音响装置。
- ✓ 在辐射区应安装遥控辐射监测系统，当辐射超过预定的水平时，该系统可发出音响或（和）灯光信号。
- ✓ 加速器必须配备适当的辐射监测装置，如便携式监测仪，气体监测仪，个人剂量计。



我国放射事故概况

1960——至今：

与辐照装置有关的事故：共67起（死：6起，10人？）

60年代：8起（死：1起，2人）

70年代：16起（无人员死亡）

80年代：34起（死：1起，1人）

90年代：7起（死：2起，5人）

2000年后：2起（死：2起，2人？）

退役源处置不当（死，3起，6人）

运行中（死，3起，4人？）



-
- | | |
|-------------|----------------------------|
| 1958 | 第 1 台辐照装置建成运行 |
| 1960 | 第 1 起事故，宁夏，1 人脱发脱毛 |
| 1963 | 第 1 起死亡事故，安徽，死亡 2 人 |
| 1985 | 第 2 起死亡事故，黑龙江，死 1，受照 332 人 |
| 1990 | 第 3 起死亡事故，上海，死 2，受照 7 人 |
| 1992 | 第 4 起死亡事故，山西，死 3，受照 141 人 |
| 2004 | 第四起死亡事故，山东，死亡 2 人， |
| 2008 | 第 4 起死亡事故，山西，死亡 1 人，受照 5 人 |
-
- 累计事故 67 起，死 10 人？
-



第二部分 核子仪与放射性测井



第一章 概述

核子仪的概念

- 核子仪是一种测量装置，它由一个带屏蔽的辐射源（具有放射性或能放出x射线）和一个辐射探测器组成。射线未穿过物质或者与需要分析的物质相互作用，为连续分析或过程控制提供实时数据。
- 核子仪在工业中应用十分广泛，主要用于过程控制和产品质量控制。



第一章 概述

- 核子仪按照辐射入射到探测器与物质发生相互作用的类型可分为三种类型：
 - 透射式核子仪
 - 反散射式核子仪
 - 核反应式核子仪



第一章 概述

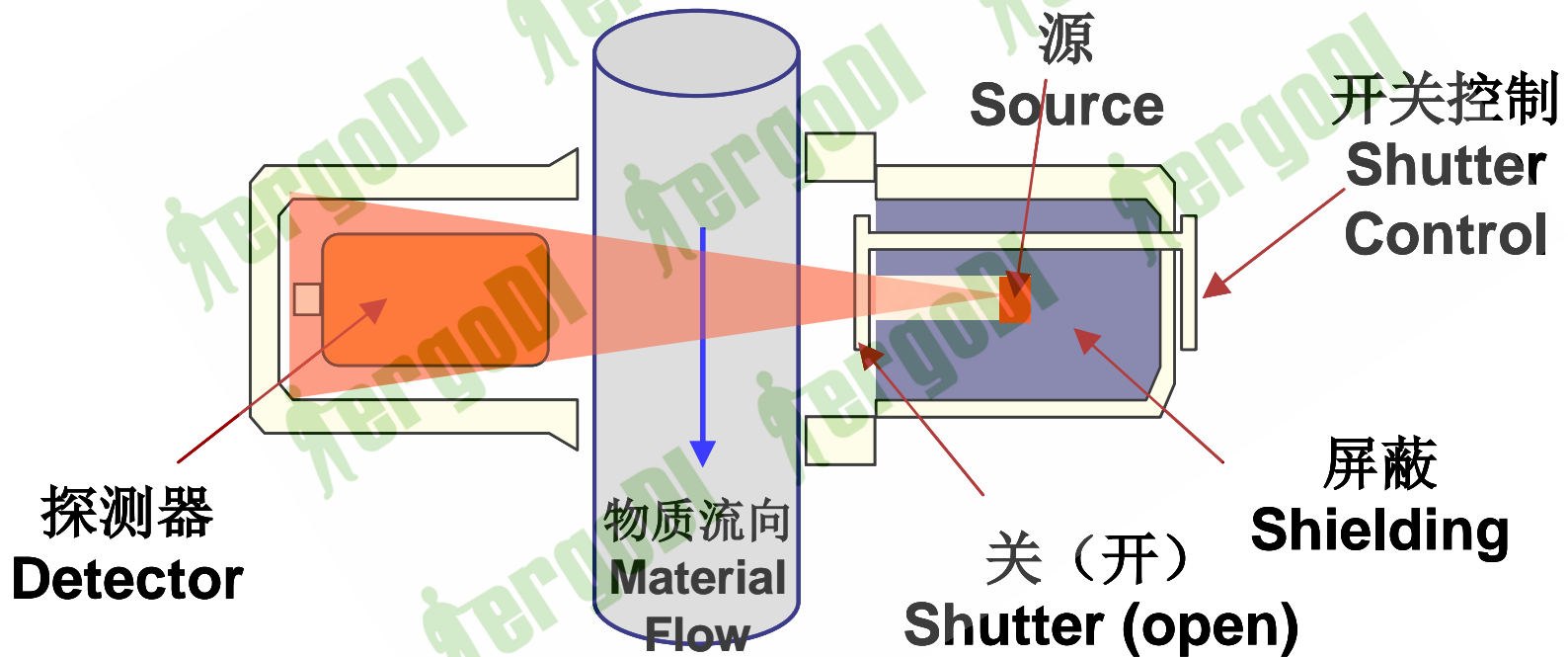
1、核子密度计

- 核子密度计的用源一般采用 ^{137}Cs （其活度范围一般在1.85GBq，50mCi左右），对大直径的管子的测量用 ^{60}Co 较多，而对几厘米直径的细管用 ^{241}Am 源。
- 在烟草行业，用 β 射线源测量连续卷烟机中烟草的密度。



第一章 概述

核子密度计的基本结构图





密度计





第一章 概述

2、测厚仪

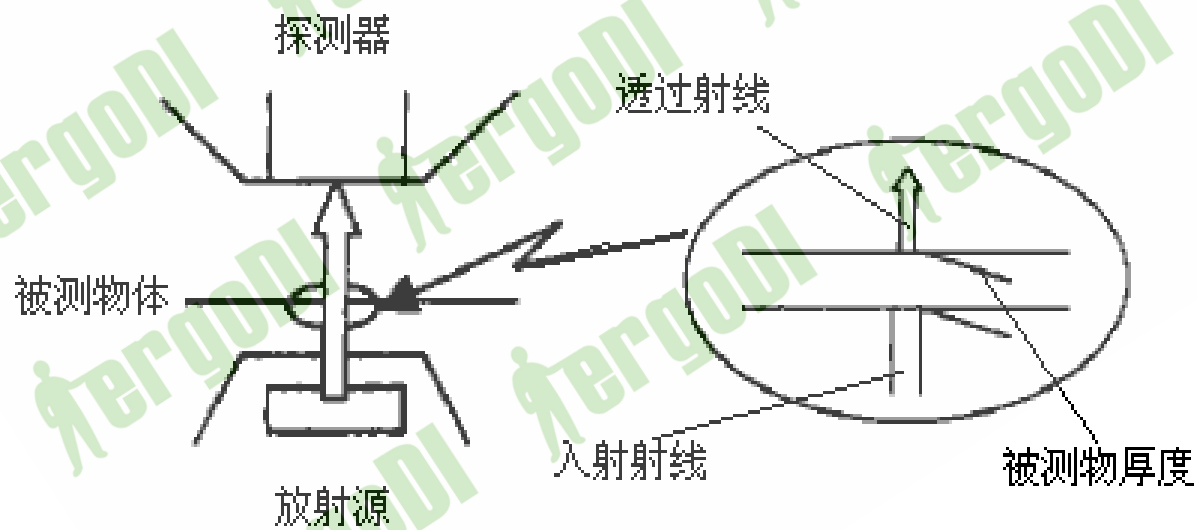
测厚仪利用 γ 射线对金属、非金属材料的厚度进行测量，其测量范围为：

- **241Am放射源：0.15~4mm**
- **137Cs放射源：2.5~60mm**
- **60Co放射源：4~90mm**
- 在工业制造过程中，经常采用表面保护和表面精加工技术。表面包覆层厚度测量中，常用的 β 放射源有：**14C**，**147Pm**，**204Tl**和**90Sr**。放射源的活度范围在**100KBq~0.4GBq**（几个**MCi~10mCi**）。



第一章 概述

测厚仪的测量原理示意图



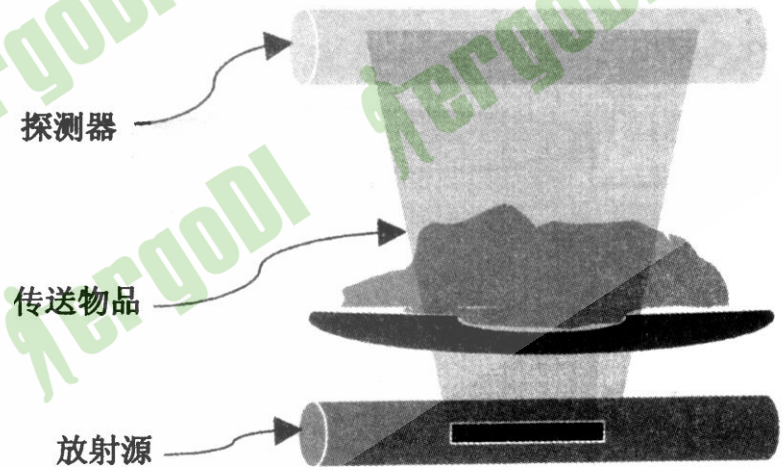


第一章 概述

3、核子秤

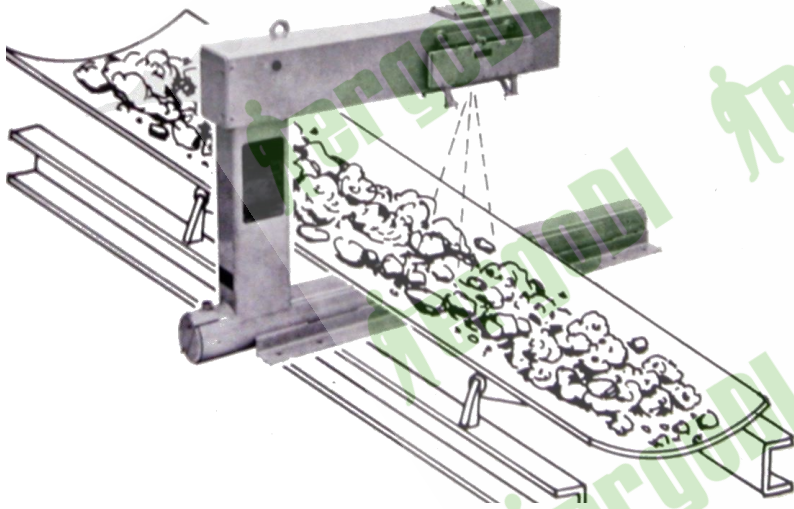
- 核子秤用的放射源为 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 源。

核子秤的基本结构图





传送带称重计





第一章 概述

4、粒位计

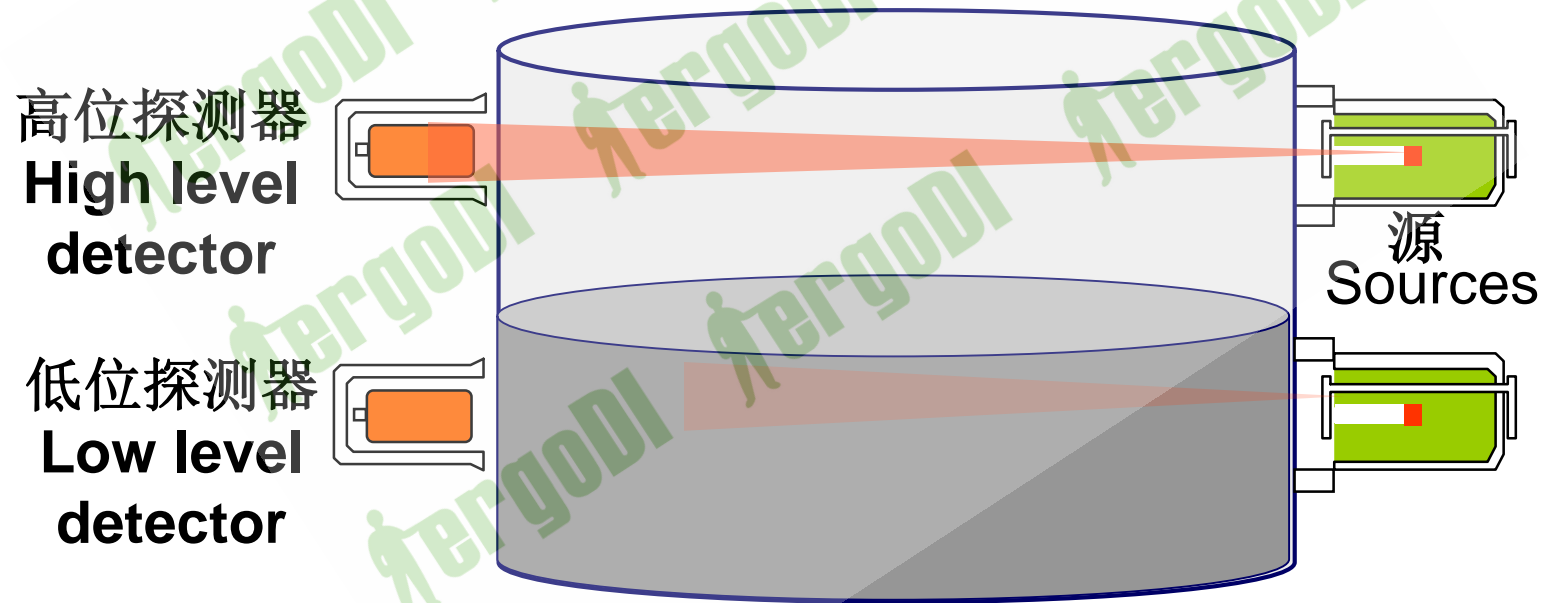
- 核子料位计的作用是对物料位置高度进行测量，主要采用 γ 射线源，常见的源有：**60Co**和**137Cs**，活度一般在**40MBq~4GBq**（约**1~100mCi**）。
- 对堆积密度小的物料（如泡沫塑料）或少量物料（如管中牙膏）的测量，用 β 射线源。典型的 β 射线源为**90Sr**，活度范围为**40~400MBq**（约**1~10mCi**）。



第一章 概述

粒位计的基本结构图

通常一个或多个仪器和探测器被用作“开/关”，用来控制料箱或料斗中物料的位置等，大、厚壁容器可能使用GBq的 ^{60}Co 。





料位计





料位计

对于小型容器，如饮料罐，可用低能 γ 射线（ ^{241}Am ）或电致x射线来探测。



^{241}Am 料位计



X-射线 (100 kVp) 料位计



第一章 概述

放射性测井的概念

- 放射性测井是根据岩石和介质的核物理性质，研究钻井地质剖面，寻找油气、煤等矿产储量以及研究油井工程的地球物理方法。
- 在煤田、铀矿勘探和石油勘探生产中，放射性测井方法获得广泛的应用，已成为勘探中的重要手段之一。
- 放射性测井包括 γ 射线测井和中子测井两类。



第一章 概述

- γ 射线测井主要应用于煤田地质勘探中
- 其应用原理是：利用放射性核素 ^{60}Co 、 ^{241}Am 或 ^{137}Cs 发射出的 γ 射线的康普顿效应，来测定钻井中岩石的散射 γ 射线的强度。
- 康普顿吸收系数与物质的密度相关，由于煤的密度较岩石小，吸收 γ 射线少，散射回来的 γ 射线多，探测器接收后输出的信号电流就强；反之，经由岩石层散射回来的 γ 射线少，信号电流就较弱。通过测定分析便可判断或判别煤层的位置和厚度。

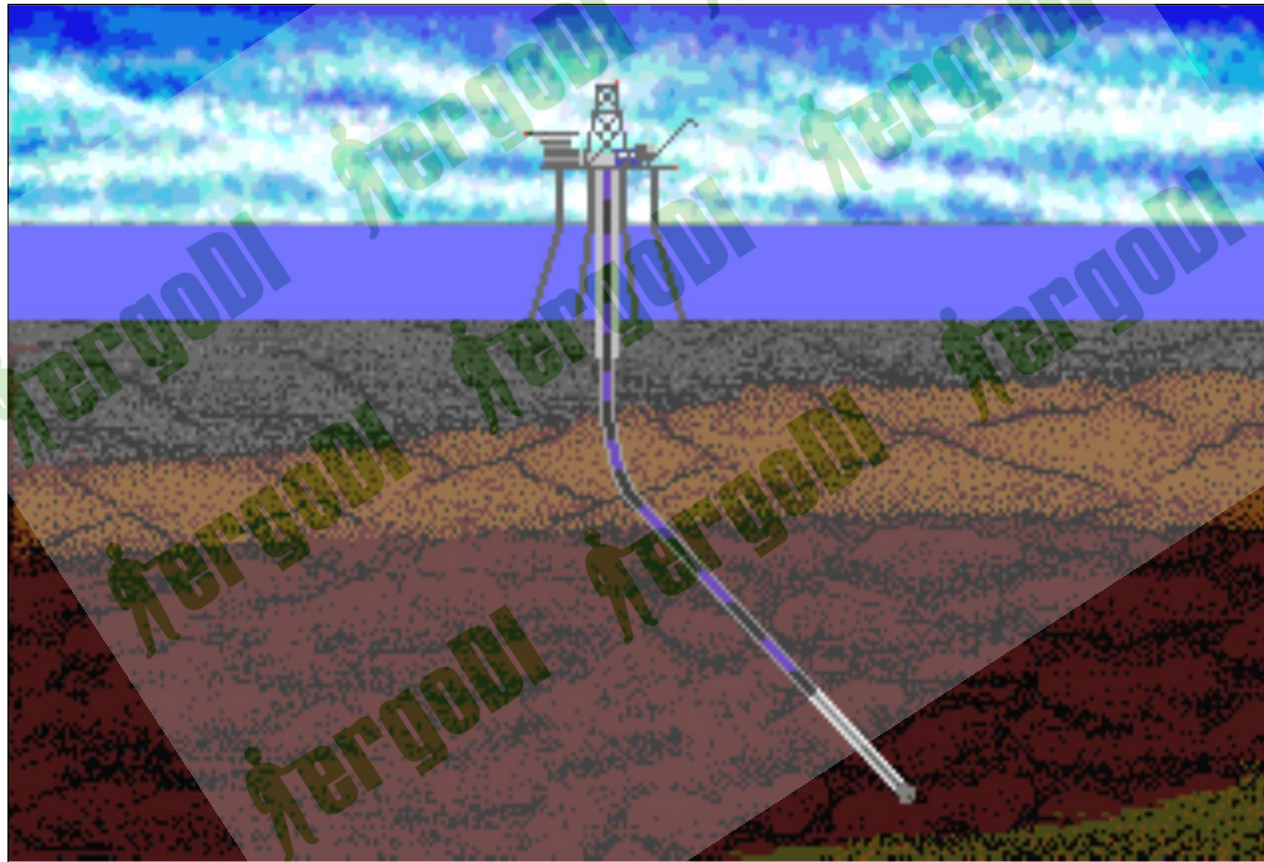


第一章 概述

- 中子测井包括中子-中子测井和中子- γ 测井等
- 中子测井主要应用于勘探石油和天然气，也可用来勘探硼、铜、银、锰、钨、汞和稀土元素等矿藏。
- 中子测井勘探石油和天然气的原理是：当中子源和中子发生器发出的中子与重元素碰撞时，被迅速弹回；中子作用于油层或水层等含氢丰富的地层时，快中子被慢化为慢中子，慢中子易被其他的物质俘获而产生 γ 射线。通过测井装置中的中子或 γ 射线探测器测定中子或 γ 射线，就可判定岩层的状况，从而找到石油和天然气。

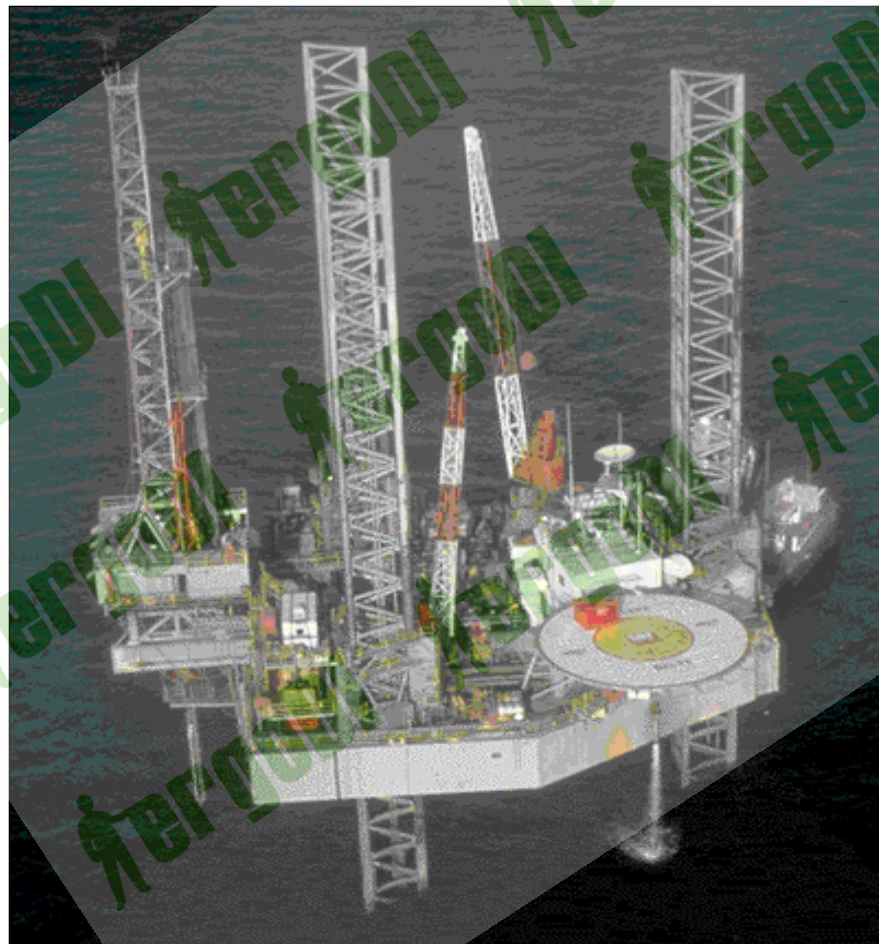


第一章 概述





第一章 概述





第一章 概述

放射性示踪物质测井

- 测井放射性示踪物质的选择原则：
 - (1) 毒性低
 - (2) 半衰期适中
 - (3) 射线能量适中
 - (4) 对载体附着能力强
- 根据以上选择原则，目前主要选用**131Ba**，**113In**。
- 在井间示踪技术方面，目前只有放射弱 β 射线、低毒性、半衰期长（**12.4年**）的氚水获得了较广泛的应用。



第二章 放射性测井的安全与防护

中子源容器



γ 源容器





第二章 放射性测井的安全与防护

- 测井容器

包含1 x 185 GBq $^{241}\text{Am-Be}$ 测井源的容器

伽玛贮运器
包括测井源

密度核验机包括: 1 x
11.85 MBq ^{137}Cs
1 x 1 3.7 MBq ^{137}Cs
2 x 37 MBq ^{241}Am 的场
校准组

包含2 x 1.11 GBq
 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子校准源





第二章 放射性测井的安全与防护

测井源的保安

测井贮存

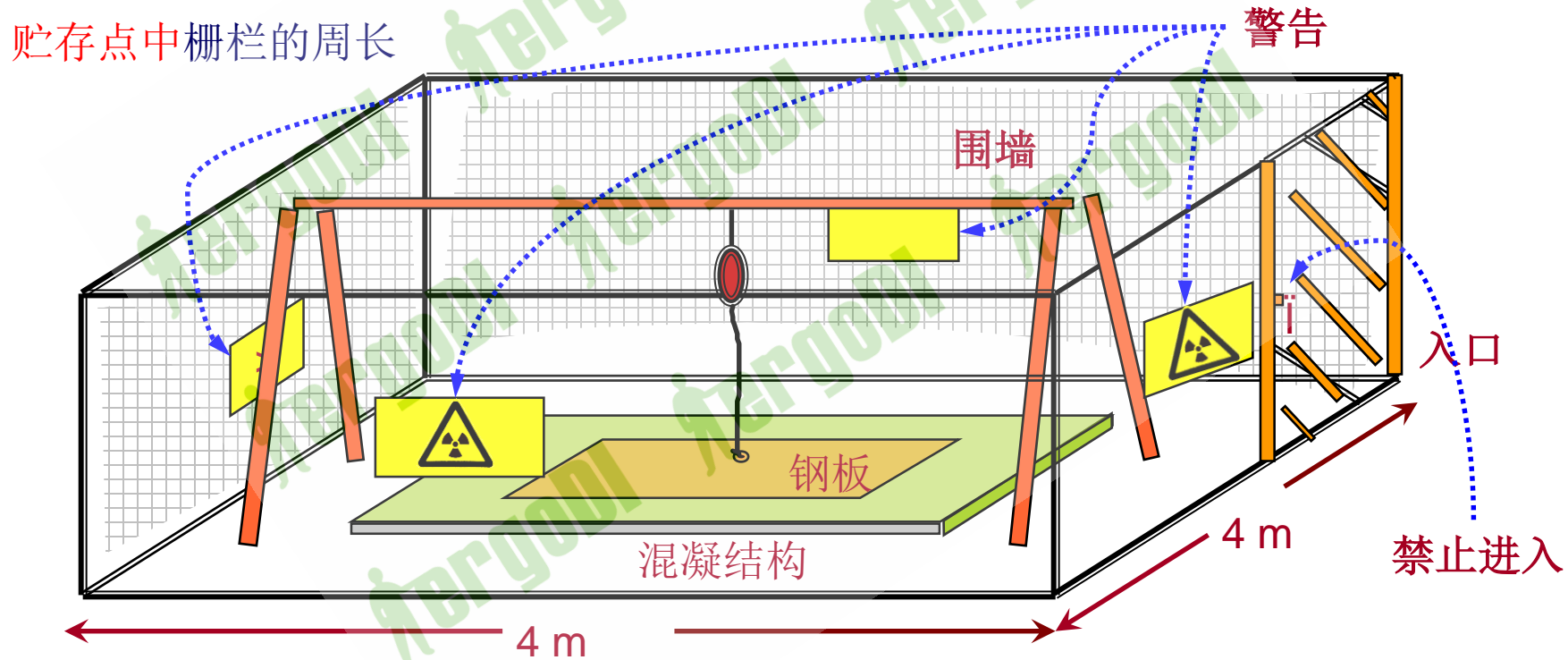


放射性废物的地下埋存



第二章 放射性测井的安全与防护

测井源的保安

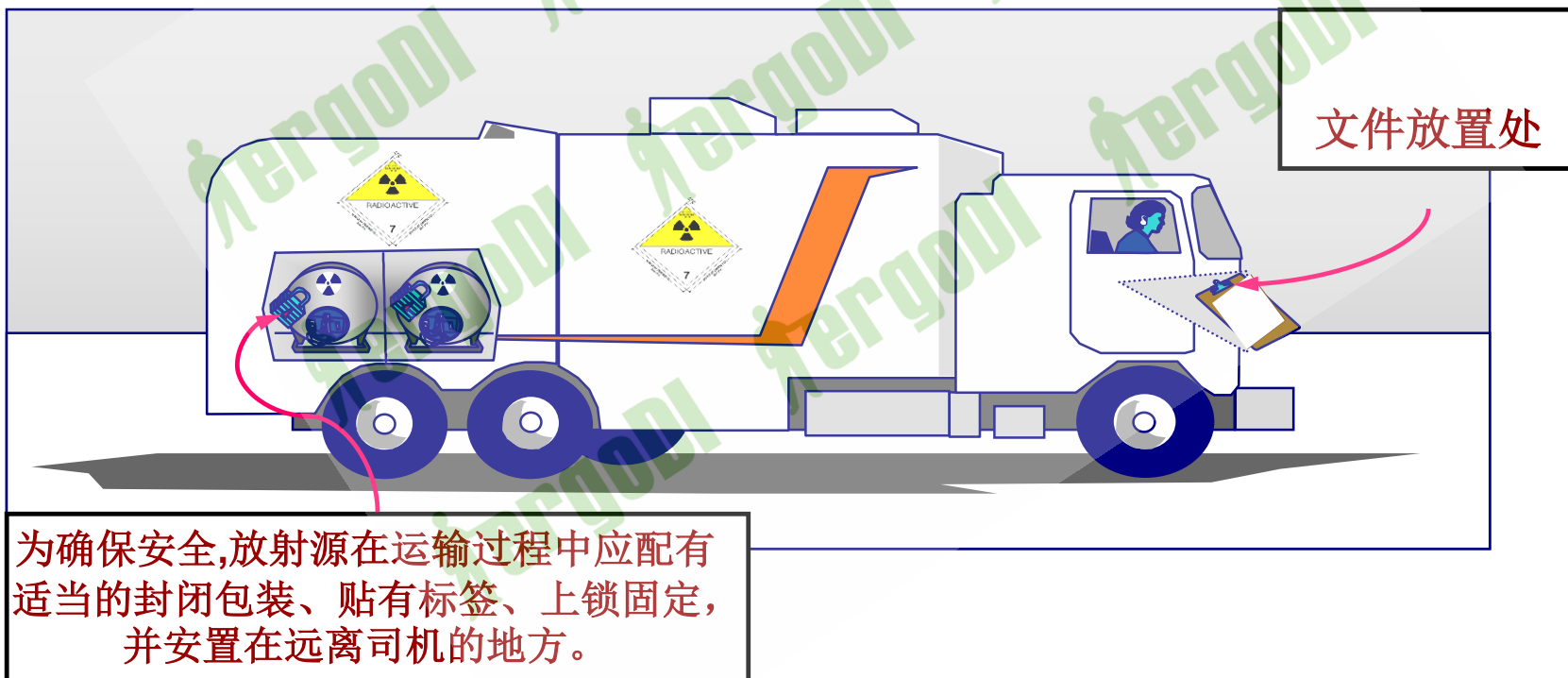




第二章 放射性测井的安全与防护

密封放射源测井的辐射防护要求

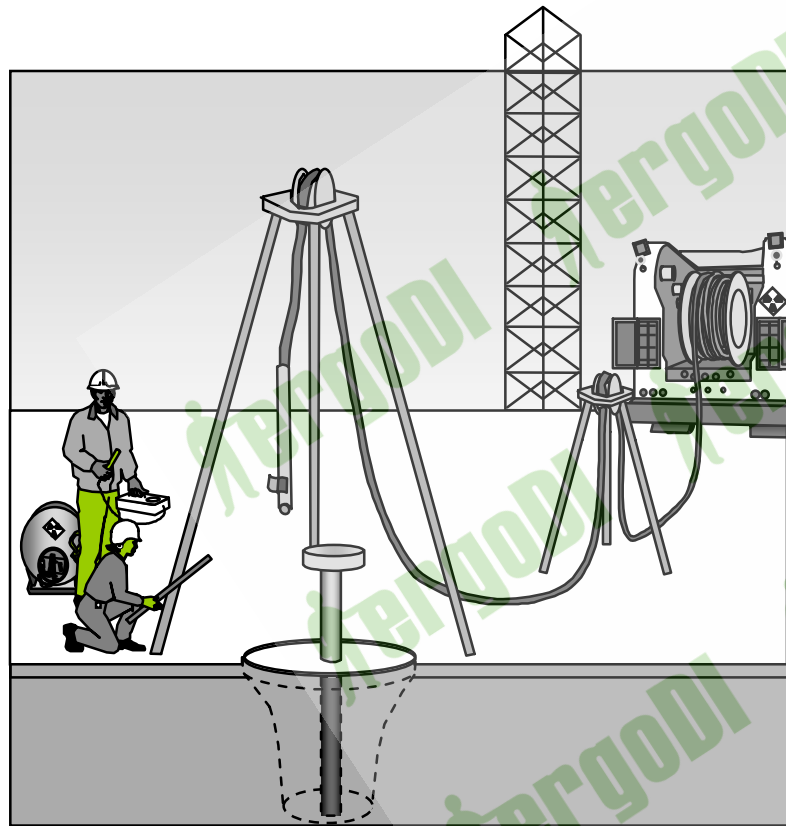
载运放射源的车辆的要求：运源车应设有固定源罐的装置；运源车内外的空气比释动能率不得大于控制值。





第二章 放射性测井的安全与防护

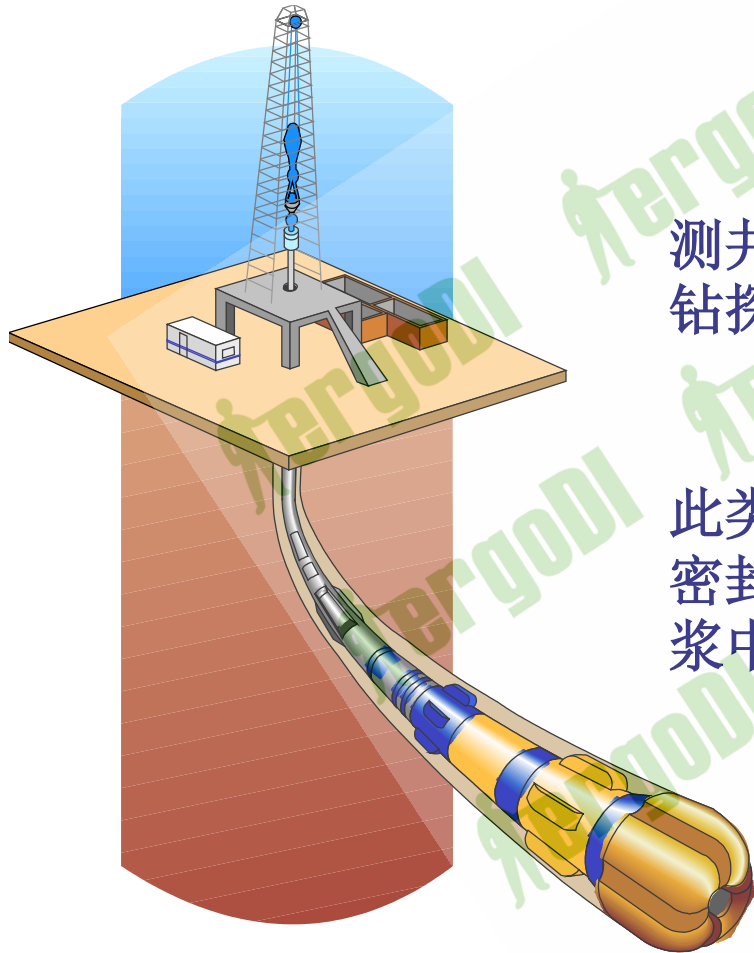
钻探测井操作



要求钻探操作全部结束后，将部分钻探设备移出钻孔，以提供通道，将测井工具放入钻孔，获取数据。



第二章 放射性测井的安全与防护



随钻测井

测井操作与钻井（孔）同时进行，不需要将钻探杆或其它设备从井中移开。

此类操作要求：测井工具中带有-一个或多个密封源，密封源安装在钻探杆上，便于从泥浆中获取遥测数据



• 第三部分:工业射线探伤



工业射线探伤辐射安全与防护

-
- 第一章:工业射线探伤源概述
- 第二章:工业射线探伤系统概述
- 第三章:工业射线探伤辐射的安全与防护



工业射线探伤辐射安全与防护

第一章：工业射线探伤源概述



工业射线探伤辐射安全与防护

工业射线探伤发展历程

- 上世纪50年代，常规射线检测基本技术和设备就得到了工业应用。
- 上世纪50~70年代，射线检测技术在原有的基础上完善，在工业射线探伤中有了广泛的应用。
- 上世纪70年代以后，随着计算机技术和图像处理技术获得了迅速发展，射线检测技术也进入了一个新的发展时代，CT技术、康普顿散射成像技术、数字射线照相技术、辐射数字成像技术等进入了工业射线探伤领域。



工业射线探伤辐射安全与防护

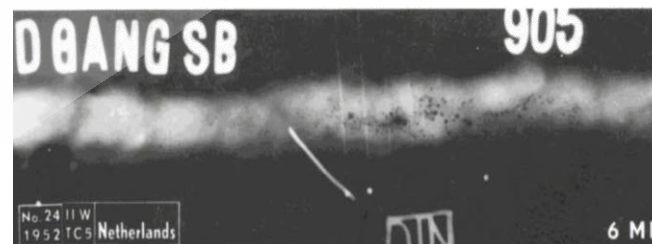
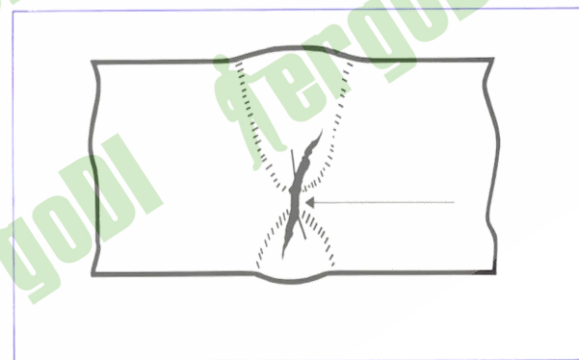
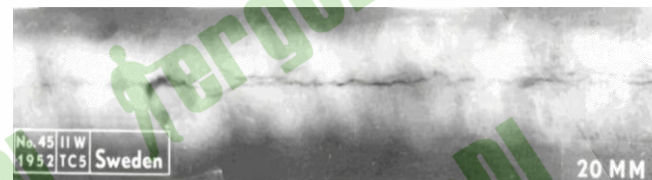
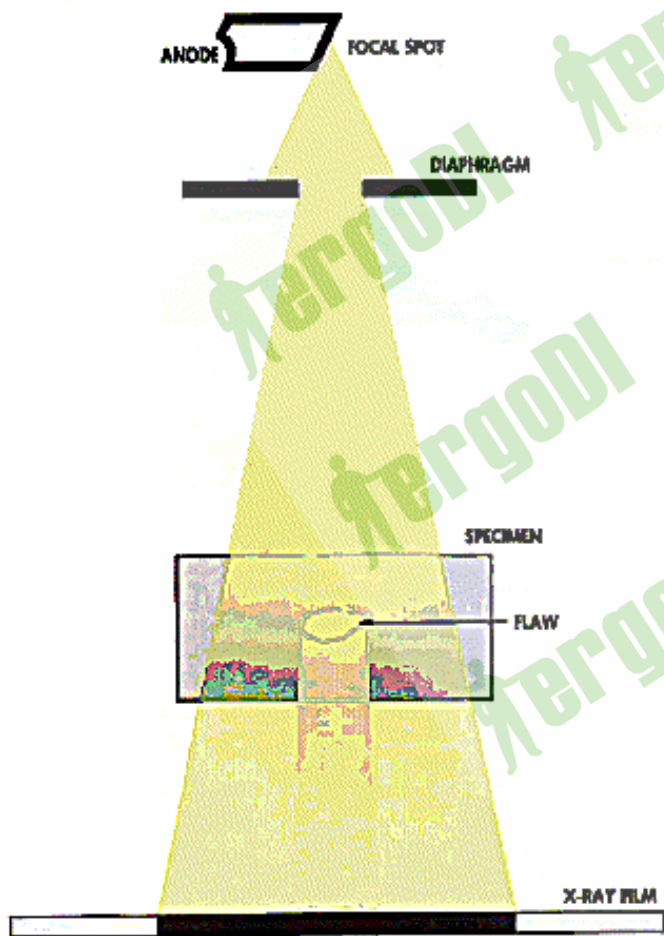
什么是工业射线探伤？

- 工业射线探伤是：
- 对一个部件或产品进行非破坏性检验过程。
- 目前，射线探伤技术应用最广泛的是X射线和 γ 射线工业探伤技术。





成像原理





工业探伤设备的类型

常见的类型:

伽马源

定向X射线

全景X射线

移动X射线

移动伽马源

爬行控制源

不常见的类型:

电子感应加速器

直线加速器

中子拍片

喷枪装置

透视



工业射线探伤辐射安全与防护

1. 1X射线探伤机



- 1895年伦琴发现X射线
- 早期的X-射线管是不可靠的
- 真空X-射线管和加热灯丝 (Coolidge-1913)
- 1922年达到200kVp 电压



工业射线探伤辐射安全与防护

X射线机按照结构通常分为三类：便携式X射线机、移动式X射线机、固定式X射线机。

有三个主要部件

- X-射线管装置
- X-射线控制面板
- 高压电缆。



简单地说**X射线机**是由**四部分**组成：射线发生器（X射线管）、高压发生器、冷却系统、控制系统。



工业射线探伤辐射安全与防护



便携式X射线机



移动式X射线机



工业射线探伤辐射安全与防护





工业射线探伤辐射安全与防护

1.2 γ 射线探伤机

- γ 射线机是用放射性同位素作为 γ 射线源辐射 γ 射线，它与X射
- 线机的一个重要不同是， γ 射线源始终都在不断地辐射 γ 射线，而X射线机仅仅在开机并加上高压后才产生X射线，这就使 γ 射线机的结构具有了不同于X射线机的特点。
- γ 射线机主要由五部分构成：源组件（密封 γ 射线源）、源容器（主机体）、输源（导）管、驱动机构和附件。



工业射线探伤辐射安全与防护

源容器

源容器必须满足认可标准的要求，以保证对使用人和公众的照射保持在合理可达到低的水平。

外壳的结构和强度有严格要求，它必须在一定的温度、压力、振动、冲击等的作用下不发生损坏，不会导致放射性同位素外泄。

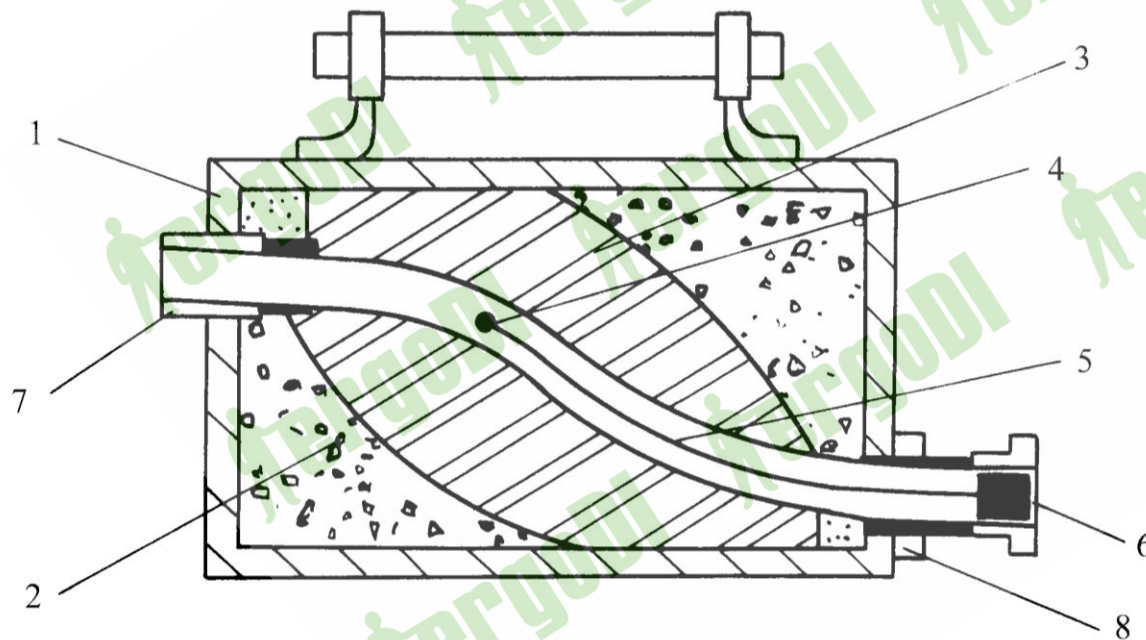
源容器的屏蔽在任可信事故或事件之后保持完整无损。





工业射线探伤辐射安全与防护

- 源容器是 γ 射线源的储存装置，是 γ 射线机的主机。

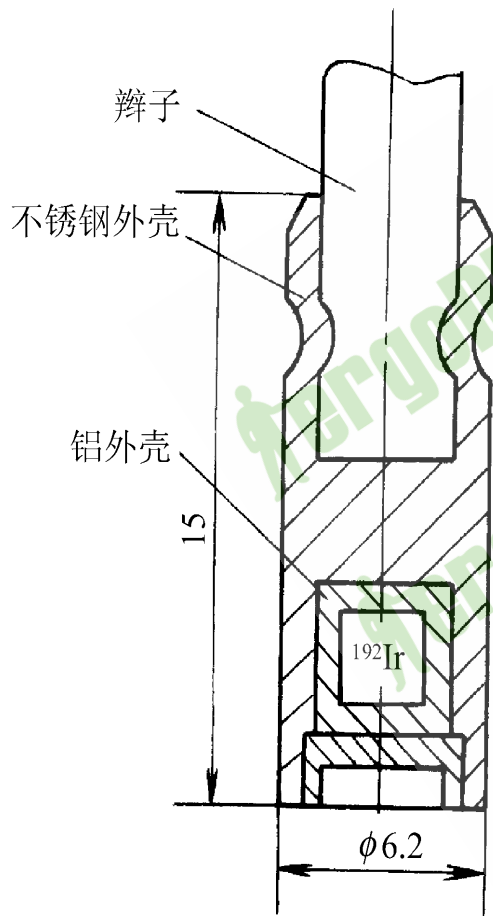


S通道 γ 射线机源容器的基本结构示意图

- 1—外壳 2—聚氨酯填料 3—贫化铀屏蔽层 4— γ 源（源组件） 5—源托
6—安全接插器 7—快速连接器 8—密封盒



工业射线探伤辐射安全与防护



源组件



附件



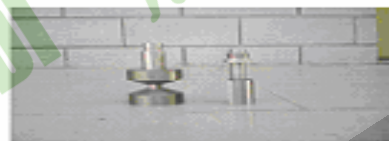
工业射线探伤辐射安全与防护



(a) DL-□A 型铱 192 γ 射线探伤机



(b) YG-60 射线探伤仪图



c) DLTS-B 型铱 192 γ 射线探伤机

(d) YG-100 自动控制器

(e) 专用定向周向准直器



(f) 小焦点探伤机总装



(g) 小焦点探伤机、传输机构、曝光管

γ 射线机系列



工业射线探伤辐射安全与防护

- 目前，在工业射线照相探伤中使用的 γ 射线源主要是人工放射性同位素： ^{60}Co ； ^{192}Ir ； ^{75}Se ； ^{170}Tm 等；
- 它们的主要特性列于下表。

γ 射线源	^{60}Co	^{192}Ir	^{75}Se	^{170}Tm
主要能量 /MeV	1.17, 1.33	0.30, 0.31, 0.47, 0.60	0.13, 0.26	0.052, 0.084
半衰期	5.3 a	74d	120 d	128 d
空气比释动能 率常数 $\Gamma_{\text{K/m}^2\text{GyBq}^{-1}\text{s}^{-1}}$	8.61×10^{-17}	3.08×10^{-17}	1.32×10^{-17}	1.97×10^{-19}
等效能量	1.25MeV	400keV	217keV	84keV
适宜厚度 (钢, mm)	40~200	20~100	10~40	≤ 5



常用放射源的特性

全位素	半值层(cm)			十分之一值层(cm)		
	铅	铁	混凝土	铅	铁	混凝土
^{192}Ir	0.6	1.3	4.6	2.0	4.3	14.7
^{60}Co	1.2	2.0	6.6	4.0	6.9	20.6
^{169}Yb	0.26	0.95		0.29	1.8	
^{75}Se	0.11	0.8	3.0	0.475	2.75	9.0



工业射线探伤辐射安全与防护

• 1.3 爬行器

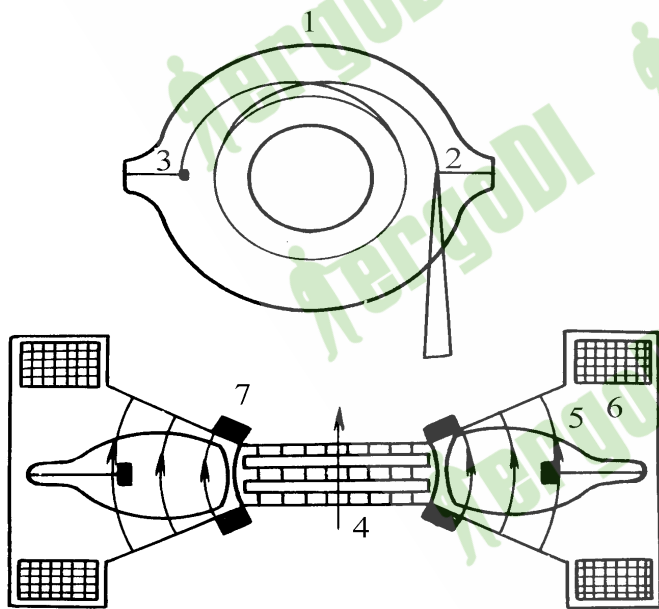
- **爬行器**是一类特殊用途的射线机，主要应用于**管道**的探伤检测，特别是**海岸管线**及**离岸管线**上的探伤检测。





工业射线探伤辐射安全与防护

- 1.4 加速器
- 适合工业射线照相探伤的加速器主要是电子感应加速器、电子直线加速器、电子回旋加速器。



- 1—环形加速器管
- 2—阳极
- 3—阴极
- 4、5—磁场
- 6—磁化线圈
- 7—辅助线圈

对工业射线探伤，它的能量 $15 \sim 35\text{MeV}$ ，焦点尺寸小，产生的锥形X射线束的顶角约为 $5^\circ \sim 6^\circ$ ，但它的电子束流强度小，一般不超过 $1\mu\text{A}$ ，因此产生的射线强度低。

电子感应加速器主体结构示意图



工业射线探伤辐射安全与防护

- 5、中子照相常用中子源
- 中子照相在国外得到应用，在国内也应发挥它的应有作用，特别是军工生产很需要，但至今中子照相尚未在工业中正式应用。
- **钷-252**中子源，半衰期适当，中子发射率高，可做成移动式装置。从发展趋势看是很有前途的。这种源是由钷-239在反应堆中子照射下连续发生中子俘获及衰变而逐步形成的。



工业射线探伤辐射安全与防护

第二章：工业射线探伤系统概述



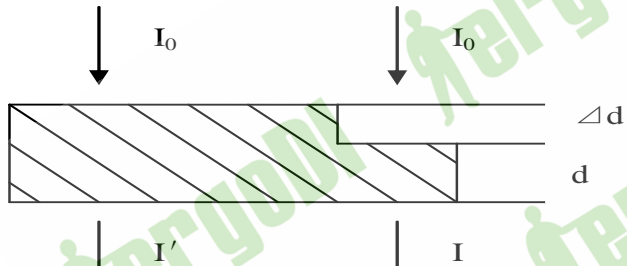
工业射线探伤辐射安全与防护

- 2.1 工业射线探伤照相系统
- 2.2 工业射线探伤实时成像检测系统
- 2.3 ICT检测系统
- 2.4 康普顿散射成像检测系统



工业射线探伤辐射安全与防护

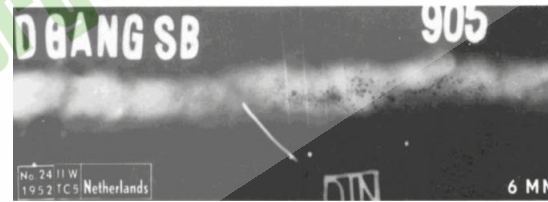
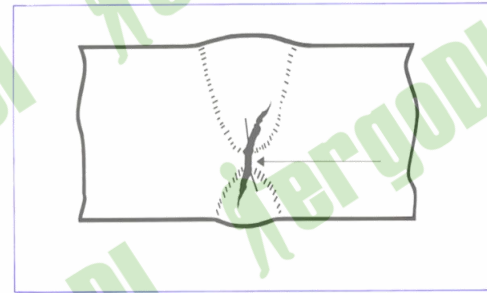
射线探伤原理



$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\mu \Delta d}{1 + n}$$

$$n = \frac{I_s}{I_d}$$

射线对缺陷的检测能力，与缺陷在射线透照方向上的尺寸、其线减弱系数与物体的线减弱系数的差别、散射线的控制情况等相关。





工业射线探伤辐射安全与防护

- 2.1 照相检测系统:
 - 1、X射线探伤照相检测系统
 - 2、CR技术系统
 - 3、热中子射线照相检测系统



工业射线探伤辐射安全与防护

射线照相检测技术的主要应用

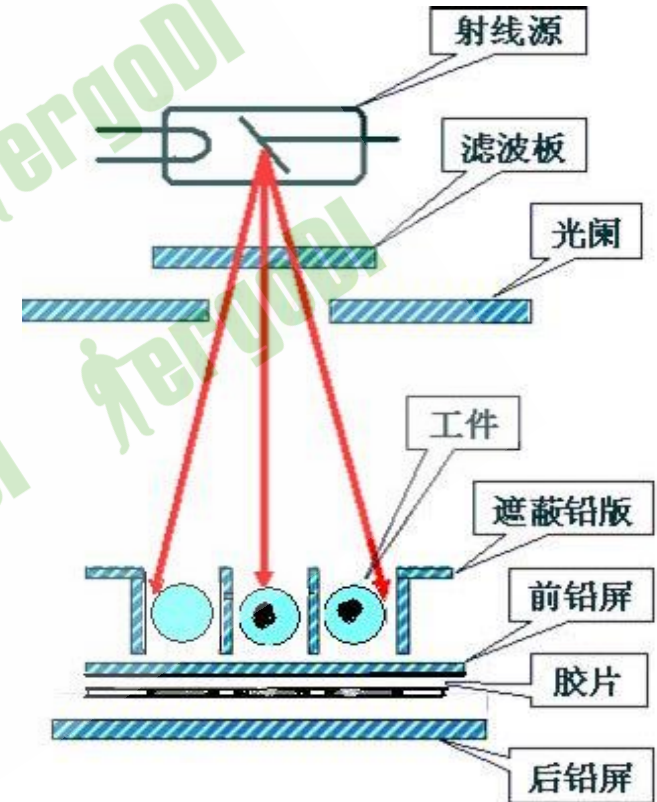
照相检测技术	主要应用
X射线	铸件、焊接件、电子元器件、结构
γ 射线	铸件、焊接件检测
中子射线	含氢物质、腐蚀、放射性材料检测
电子射线	纸张、邮票等检测
成像板射线	研究
高速射线	弹道、爆炸、工艺、生物过程研究



工业射线探伤辐射安全与防护

1、X射线探伤照相检测系统

- 一般将被检物体置于X射线源1米左右的位置，使射线尽量垂直穿透被检部位。
- 将装有胶片和增感屏的暗袋紧贴于试件背后放置，使X射线照射适当时间进行曝光，在胶片乳胶层产生潜像；
- 把曝光后的胶片进行暗室处理得到的底片置于观片灯上观察；
- 依底片的黑度和缺陷图像判断缺陷的种类、大小、数量和位置分布，并按标准要求对缺陷进行等级分类。



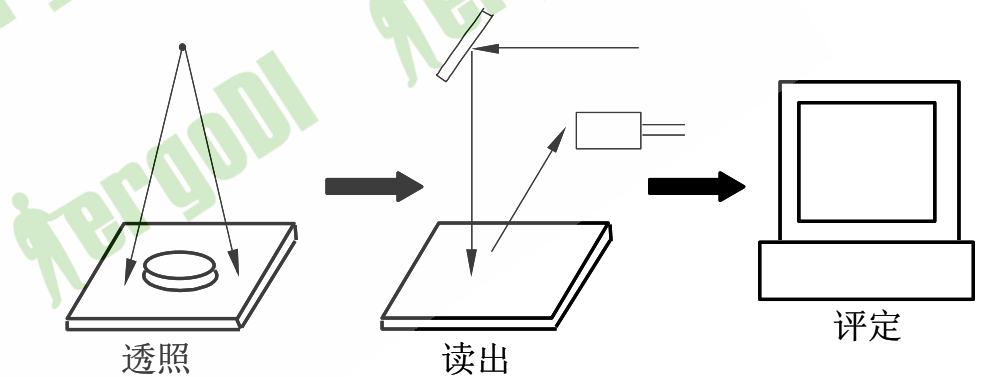


工业射线探伤辐射安全与防护

2、计算机射线照相检测系统CR

是数字射线照相技术中一种新的非胶片射线照相技术。目前，它采用储存荧光成像板代替胶片完成射线照相检测。

荧光成像板插入CR系统的成像板读出器（扫描器）中，采用激光扫描成像板上的图像，产生的发射荧光经光导收集送入光电倍增器，转换成模拟电信号，经A/D转换形成数字信号，储存在计算机内存中，成为初始图像。





工业射线探伤辐射安全与防护

3、热中子射线照相检测系统

中子本身几乎不能使胶片感光，因此在热中子射线照相中必须采用**转换屏**。转换屏在中子的照射下可以发射 α 、 β 或 γ 等射线，利用这些射线使胶片感光，记录透射中子分布图像，完成中子射线照相。

转换屏分为两类：一类是钷、锂、硼、镉等，它们在中子照射下瞬时发射射线；另一类是铀、镭、铯等，它们在受到中子的照射时，可以俘获中子，形成具有一定寿命的放射性核，在以后的放射性衰变中放射出 γ 射线。

按照选用的转换屏可把热中子射线照相分为**两种**方法：

直接曝光法，选用第一类转换屏（瞬时屏）

间接曝光法，选用第二类转换屏（活化屏）



工业射线探伤辐射安全与防护

- 2.2 实时成像检测系统

- 1、实时成像检测系统的基本构成
- 2、线阵列射线实时成像检测系统
- 3、辐射数字成像技术系统



工业射线探伤辐射安全与防护

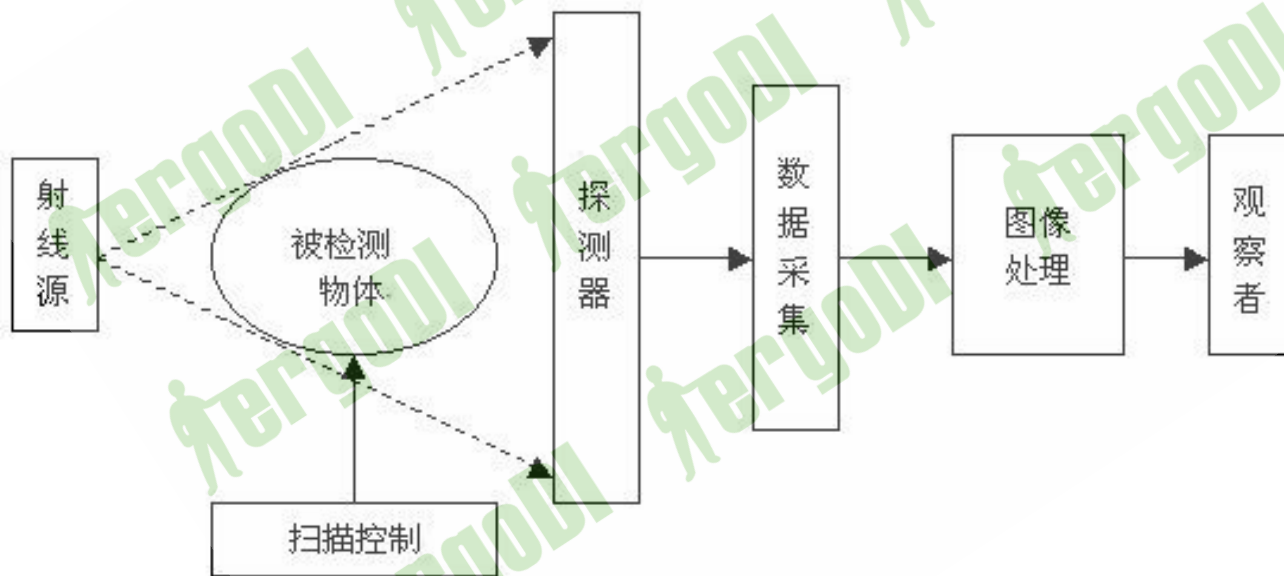
射线实时成像检测技术的主要应用：

实时成像检测	主要应用
X射线荧光	机场、车站、海关检查
图像增强	工业在线检测
数字	机场、车站、海关检查
X射线光导摄像	生物、文物考古等研究



工业射线探伤辐射安全与防护

1、实时成像检测系统的基本构成

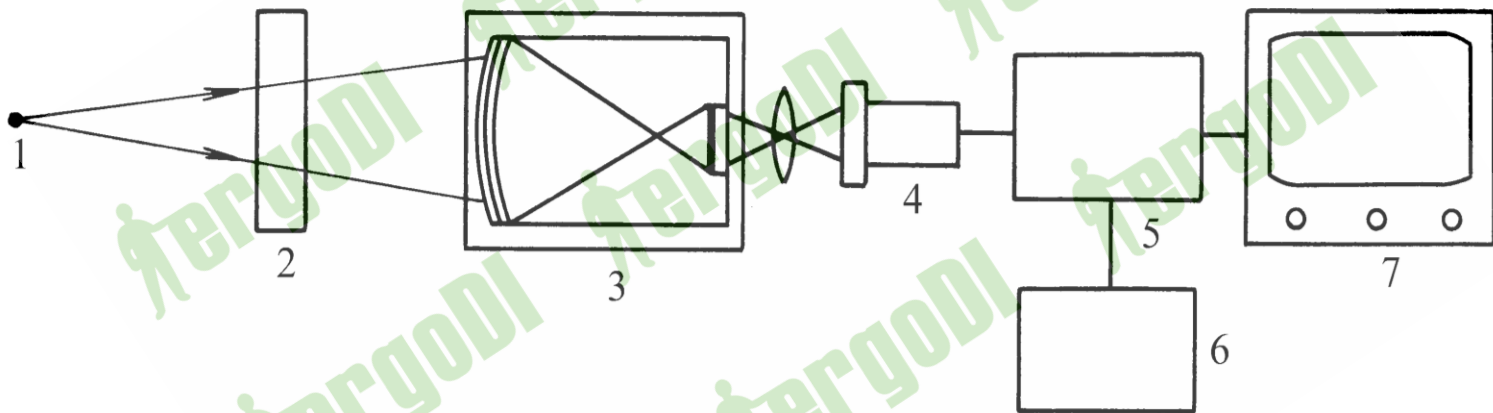


典型的射线实时成像检测系统框图



工业射线探伤辐射安全与防护

实时成像检测系统

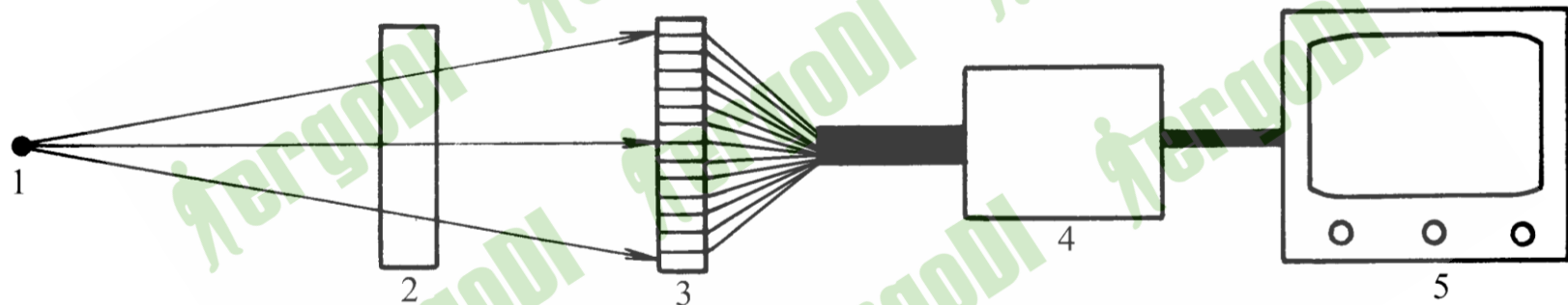


- 1—射线源 2—机械装置与工件 3—图像增强器 4—摄像机
5—图像处理单元 6—计算机与软件系统 7—图像显示与存储单元



工业射线探伤辐射安全与防护

2、线阵列射线实时成像检测系统



1—射线源 2—机械装置与工件 3—线阵列探测器 4—图像处理单元 5—图像显示和存储单元

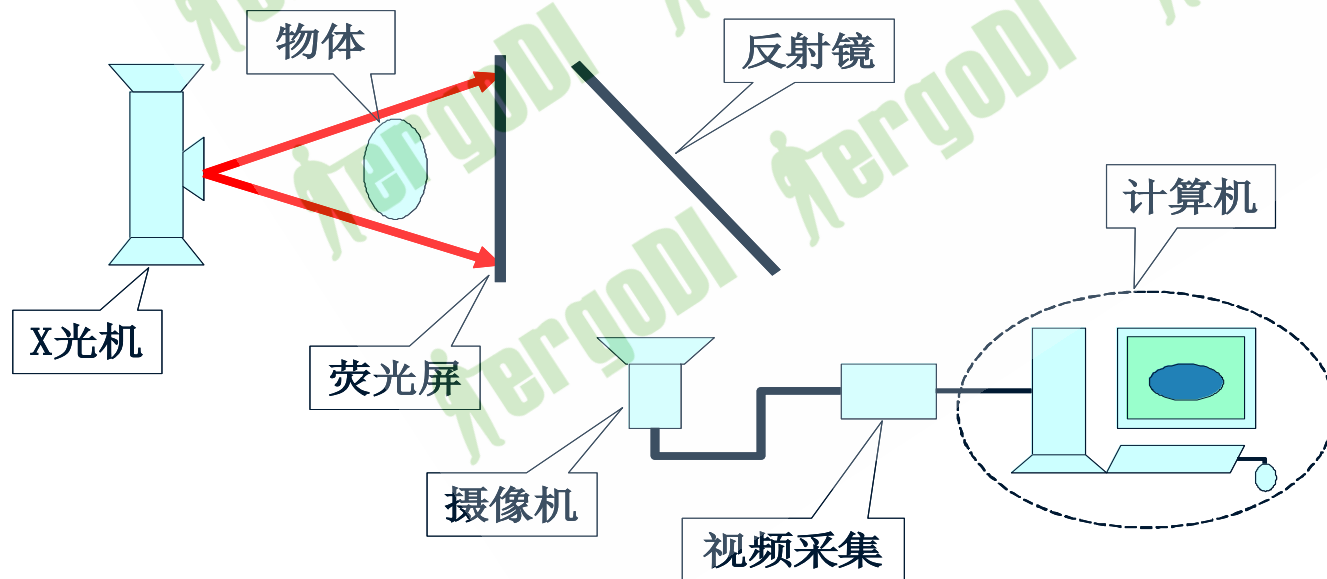
线阵列探测器单元的基本构造和性能与成像板的探测单元相同。



工业射线探伤辐射安全与防护

3、辐射数字成像技术系统

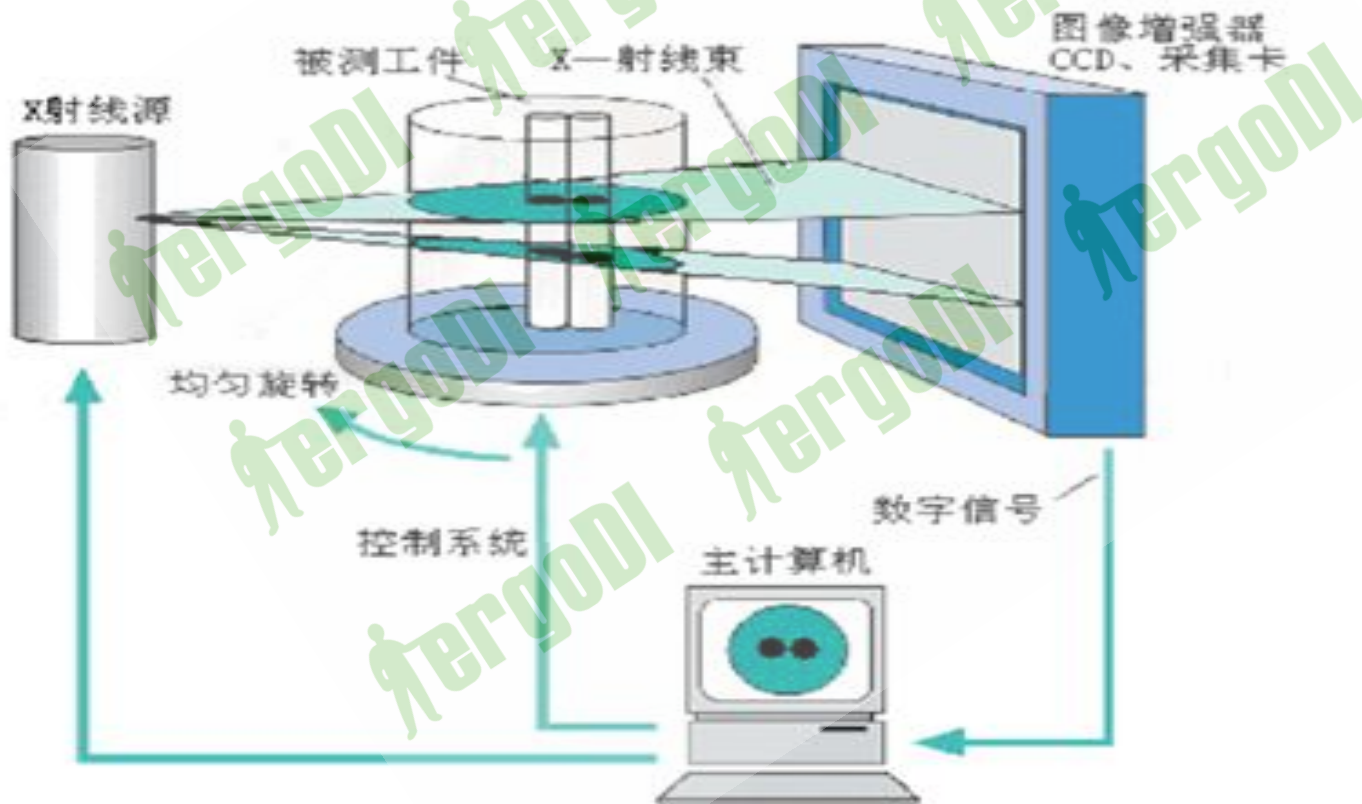
- 辐射数字成像技术**特点**：数字化、实时显示；分辨率高、图像清晰、细腻；图像后处理；数字化存储、传输。





工业射线探伤辐射安全与防护

2.3 ICT检测系统

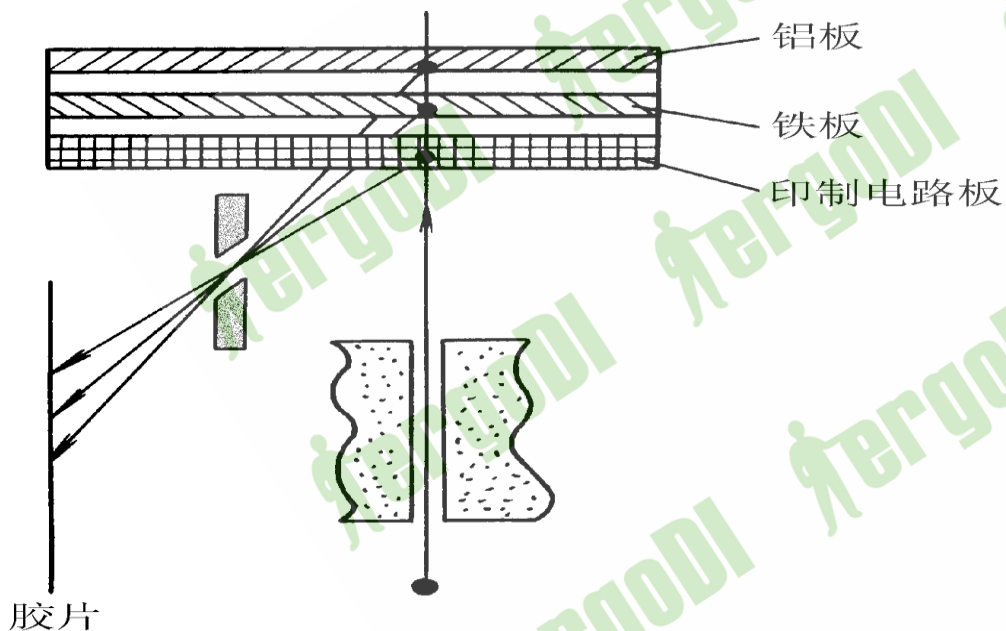


锥束扫描示意图



工业射线探伤辐射安全与防护

2.4 康普顿散射成像检测系统



特点:

- 1) 单侧几何布置，即射线源与检测器位于物体的同一侧。
- 2) 图像的对比度在理论上可达到100%。
- 3) 具有层析功能，并且一次可以得到多个截面的图像。



工业射线探伤辐射安全与防护

第三章：工业射线探伤实践



工业射线探伤辐射安全与防护

- 3.1 γ 射线射线探伤防护区的确定
- γ 射线探伤目前使用的放射源主要为：
- ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir 源。
- 为了保证现场探伤人员和公众的辐射安全，将现场探伤区划分
- 为“控制区”和“监督区”。
-



工业射线探伤辐射安全与防护

控制区范围

剂量率限制

- 不超过 $15 \mu\text{Sv/h}$
- 不超过公众剂量/剂量率限值
- 我国控制区边界的剂量率(空气比释动能率)限制为 $15 \mu\text{Gy/h}$ 。监督区边界的剂量率限制为 $2.5 \mu\text{Gy/h}$ 。





工业射线探伤辐射安全与防护

识别控制区

- 辐射警告标志
- 障碍物
- 额外的警报系统 (能听到的、能看到的)
- 适当设置保安人员



工业射线探伤辐射安全与防护

限制控制区边界剂量率

- 利用现有的屏蔽设施
- 提供额外的屏蔽装置
- 使用铅片和铅弹
- 采用准直器（采用合适的射线准直器是将辐射射线限制在需要的区域而减少其他区域剂量率最有效的方法）。



工业射线探伤辐射安全与防护

控制区和监督区的 management 方法

- 由探伤团队监督和直接管理
- 如果可能，锁住入口
- 增加额外的、经过培训的保安人员
- 清空控制区
- 考虑设置障碍物。如门、围墙等

在实施探伤前必须根据作业条件明确划分出**控制区**和**监督区**，并在各自的边界上设置电离辐射警告标志。



工业射线探伤辐射安全与防护

3.2 γ 射线探伤机的辐射安全与防护要求

如同其他辐射工作一样， γ 探伤中存在着常规运行中的辐射和潜在辐射危害。

γ 探伤机按源容器的可移动性分为三类：

P类： 便携式。

M类： 移动式。

F类： 固定式。



工业射线探伤辐射安全与防护

便携式装置



- 可以一个人携带; < 50 kg;
- 最通用的类型;
- 特制的可携带活度达3.7 TBq的 ^{192}Ir 。



工业射线探伤辐射安全与防护

移动式装置



- 通常利用一个手推车移动;
- 常用来容纳 ^{60}Co



工业射线探伤辐射安全与防护

固定式装置

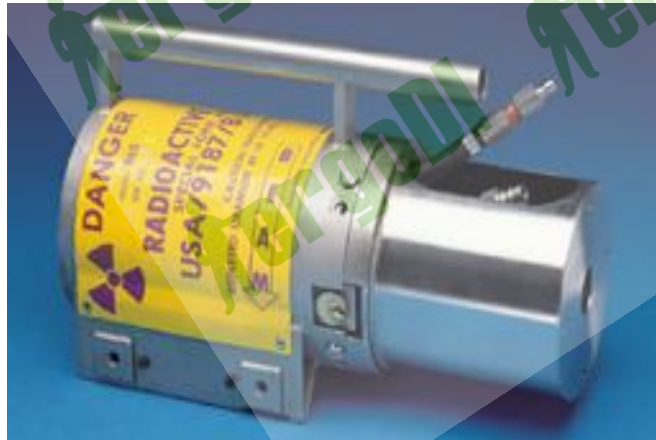


- 在同一地点使用;
- 非常笨重;
- 可使用活度达 8.5 - 37 TBq 的⁶⁰Co



工业射线探伤辐射安全与防护

- 探伤机的结构形式主要有**两种**：
- **第一种**是源容器中密封源不能从中取出来进行照射。
- 源在装置内部。
- 包含一个快门机构
- 利用真空或大气压力将源移动到曝光位置。





工业射线探伤辐射安全与防护

第二种是可以将密封源从中移出来的照射装置，它通过一个输源管将源引入照射头进行照射。

- 放射源可以从源容器发射出 采用遥控装置
- 在照射期间源未被屏蔽 (在使
用时要校准)。
- 手动或自动控制
- **探伤装置的安全使用期限为10年，禁止**
- **使用超过10年的探伤装置。**





工业射线探伤辐射安全与防护

γ 探伤源:

γ 探伤机常用的 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{192}Ir 和 ^{170}Tm 4种放射源的半衰期 $T_{1/2}$ 、 β 射线能量 E_{β} 、光子能量 E_{γ} 、及空气比释动能率常数 Γ_K 推荐值列于下表。

核素	$T_{1/2}$ (d)	E_{β} (MeV)	E_{γ} (MeV)	Γ_K ($\text{m}^2\text{GyBq}^{-1}\text{s}^{-1}$)
^{60}Co	1925.3	0.31	1.17, 1.33	8.61×10^{-17}
^{137}Cs	11050	0.5	0.662	2.17×10^{-17}
^{192}Ir	74.3	0.6	0.31, 0.60	3.08×10^{-17}
^{170}Tm	129	1.0	0.052, 0.084	1.97×10^{-19}



工业射线探伤辐射安全与防护

- γ 探伤源应用的注意事项

- a、 γ 探伤源一般在使用该核素的3~5个半衰期以后就要更换。
- b、每一密封源密封性检测周期不能超过六个月。
- c、操作人员在一次更换源的过程中接受的当量剂量不能超过0.5mSv



工业射线探伤辐射安全与防护

源的更换:

- 用新的源更替旧的（衰减过的）源；
- 典型的用贫铀屏蔽；
- 有一个锁闭系统，防止在传递过程中发生意外掉在外面；
- 有两个或更多的储存腔或管子



工业射线探伤辐射安全与防护

源容器

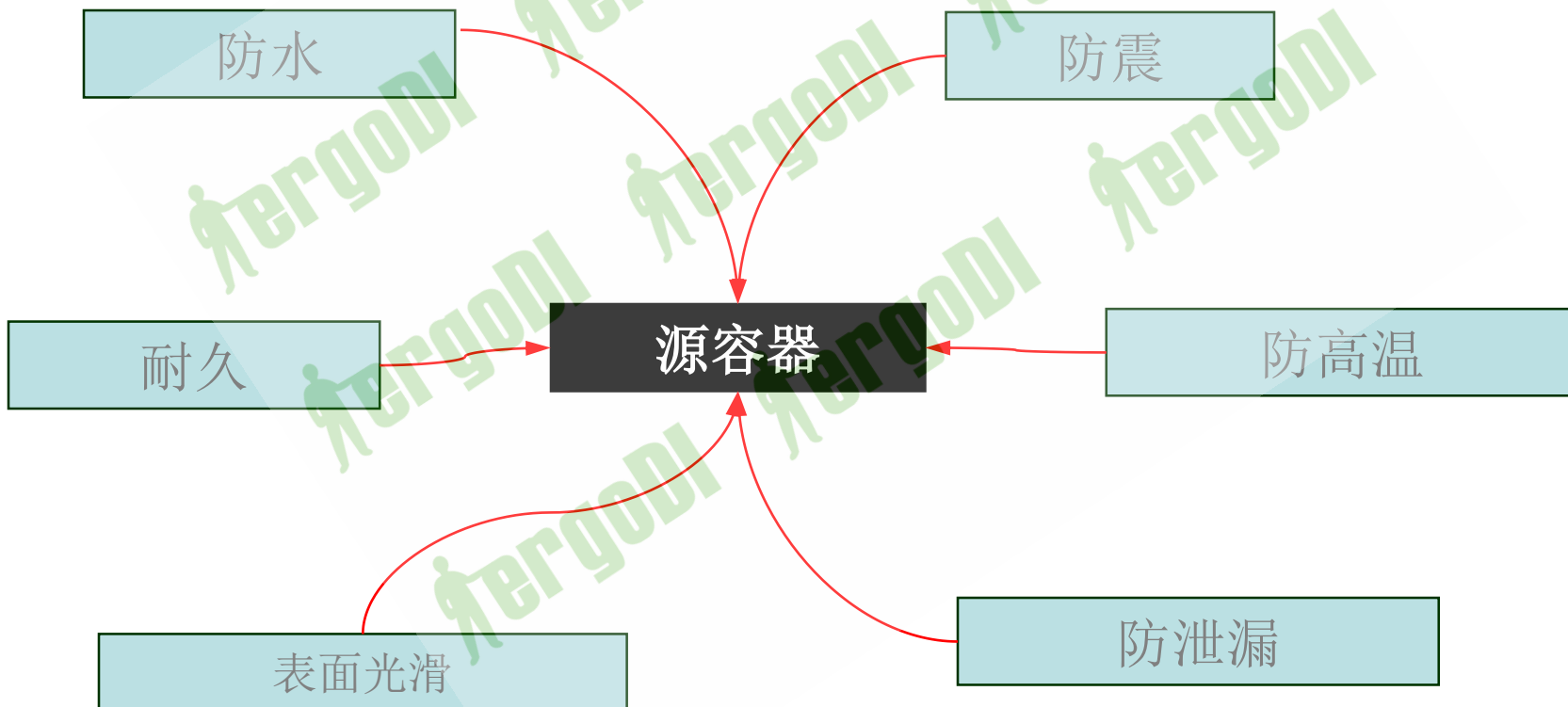
源容器是探伤源贮于贮藏（非工作状态）位置时的屏蔽设备，所以它的安全与防护一定要满足下列要求：

- 采用铅或者铀屏蔽；
- 放在固定的台架上容纳密封的放射源；
- 使用辅助设备来控制放射源的移动；
- 暴露放射源使底片曝光生成照片。



工业射线探伤辐射安全与防护

源容器的一般设计要求





工业射线探伤辐射安全与防护

源容器的一般设计要求

防震

源容器



垂直震动测试



工业射线探伤辐射安全与防护

源容器的一般设计要求

防高温

源容器

保证在意外火灾后源容器的安全性





工业射线探伤辐射安全与防护

源容器的一般设计要求



设备类型	设备的剂量率($\mu\text{Sv/h}$) 最大剂量率			
	at 1 m		at surface	at 5 cm
便携式	20	AND EITHER	2000	500
移动式	50		2000	1000
混合式	100		2000	1000



工业射线探伤辐射安全与防护

源容器的一般设计要求

耐久

源容器

耐久测试

- 所有的装置都有要求
- 对最长的导源管进行测试
- 对最大的导源管直径进行测试
- 每次测试要进行完整的进源和出源周期测试

- ANSI 和 ISO的区别
- ANSI 20,000 次周期，直导管结构
- ISO 50,000 次周期，特殊的导管结构



工业射线探伤辐射安全与防护

源容器的一般设计要求

防水

表面光滑

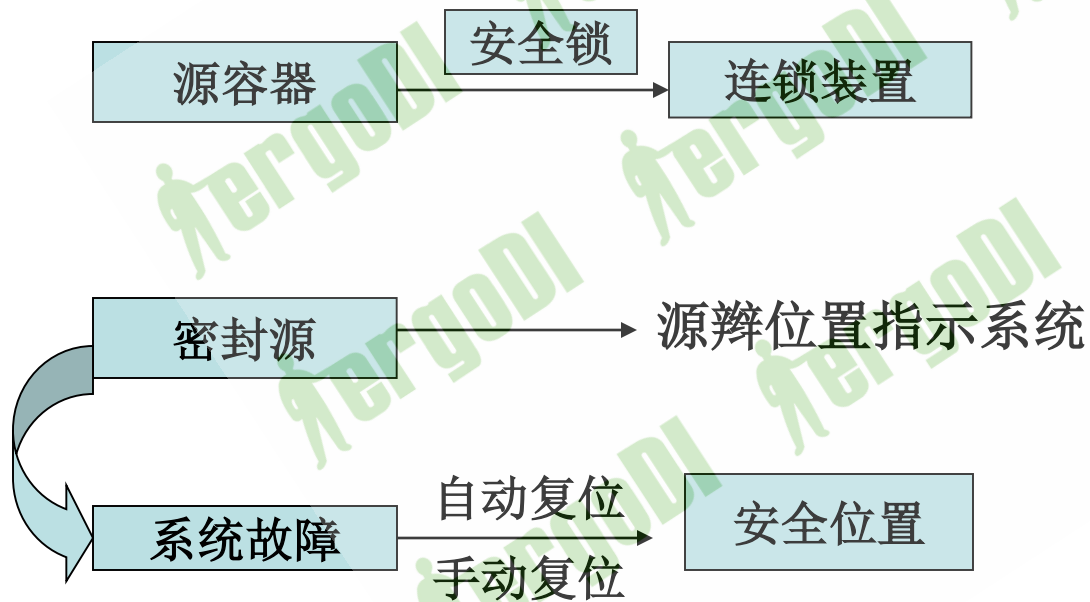
源容器

源容器的表面应光滑、平整、无凹陷，防止积水。



工业射线探伤辐射安全与防护

安全装置





工业射线探伤辐射安全与防护

3.3 γ 射线探伤作业场所的辐射安全与防护要求

固定式探伤

- ① γ 探伤室应尽量设在**单独的房间**内。
- ②**操作间**（操作室）必须与**探伤室**分开，辐射防护墙外**5cm**处剂量率应小于 **$2.5 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$** 。
- ③探伤室入口门外要有电离辐射警告标志。
- ④机房内安装**固定式剂量仪**。



工业射线探伤辐射安全与防护

移动式探伤

- ① 必须将工作场所划分为控制区和监督区。
- ② 控制区边界外空气比释动能率应低于 $15 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在其边界必须悬挂清晰可见的“禁止进入放射性工作场所”警示标识。
- ③ 作业结束后，必须用辐射剂量监测仪进行监测，确定放射源收回源容器后。工作人员方能携带探伤装置离开现场。



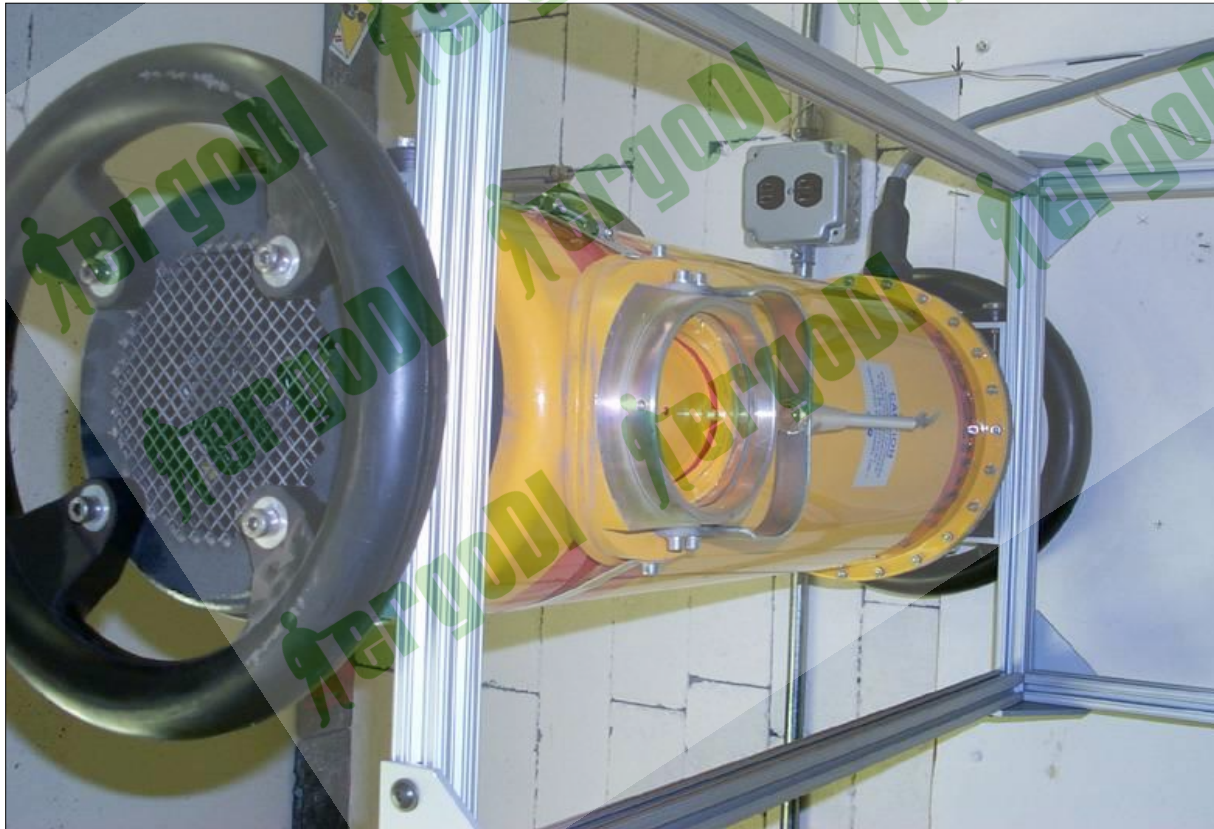
工业射线探伤辐射安全与防护

- 3.4 安全操作
- 国内的一些事故很多是由于工作结束后放射源没有回位到正确的安全位置造成的，因此探伤**完毕后**清理现场的工作对放射源安全使用具有特别**重要的意义**。
- 当探伤机出现故障时，切忌浮躁，要保持冷静，在有剂量测量仪器时刻测量剂量的安全情况下，设法使源释放回源容器。
- **千万牢记**：任何情况下都不允许手或身体其他部位接触源。



工业射线探伤辐射安全与防护

3.5 X光机





工业射线探伤辐射安全与防护

X光机控制

- 控制面板
- 联动装置
- 预警系统
- 关键开关来操作
当未运转时可离开





工业射线探伤辐射安全与防护

3.6 X射线探伤机的辐射安全与防护要求

- X光机必须：
 - 符合国家电气安全要求
- 有适当地分类的控制面板
- 有足够长的电缆 (从控制面板到X光机) 例如 $> 20 \text{ m}$ 。
- 有一个关键的控制面板以便预防误操作。



工业射线探伤辐射安全与防护

3.7 X射线探伤作业场所的辐射安全与防护要求

X射线专用探伤室

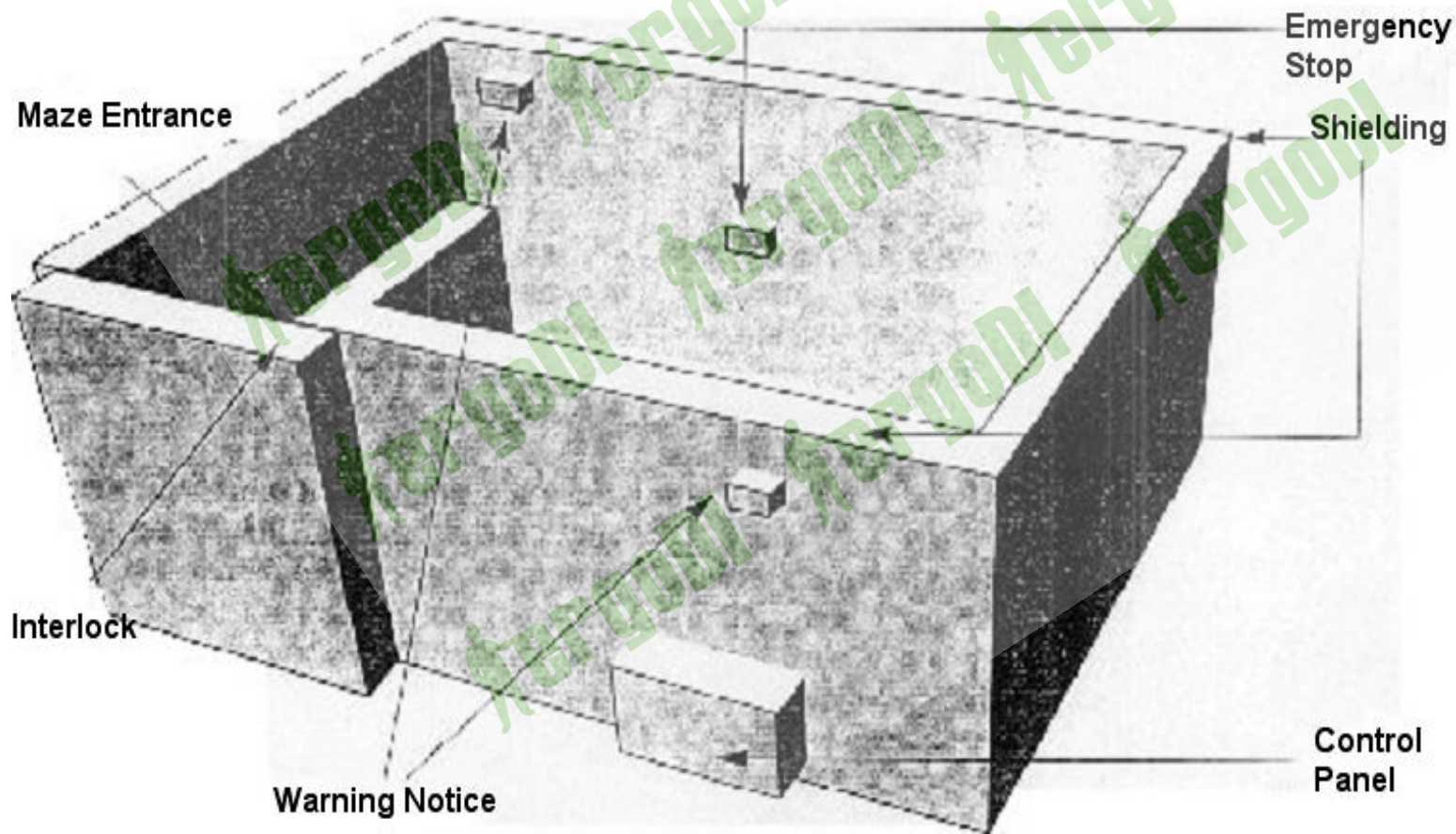
基本要求:

- 迷宫式入口
- 墙壁厚度
- 房顶
- 天空散射照射
- 警示灯
- 紧急按钮



工业射线探伤辐射安全与防护

X射线专用探伤室的屏蔽设计





工业射线探伤辐射安全与防护

场地的安全和报警系统

- 辐射预警信号
- 在源照射期间应有声像指示
- 控制和监测的范围



工业射线探伤辐射安全与防护

场地报警系统

- 防护区域必须有警示标示
- 入口必须有连锁装置





工业射线探伤辐射安全与防护

场地报警系统

- 必须在场地内部和外部同时安装伽玛和声音报警器。
- 当辐射源处于照射和X-射线装置运行期间应该激活可视报警装置。
- 当门打开时应该有声音警报。





工业射线探伤辐射安全与防护

场地报警系统



- 在防护区域内要显示剂量率
- 同时能响应伽玛射线、X射线和中子辐射。



工业射线探伤辐射安全与防护

X射线现场探伤

划分控制区和监督区。

将作业时被检物体周围的空气比释动能率在 $15 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的范围内划为控制区。

将作业时被检物体周围的空气比释动能率在 $1.5 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的范围划为监督区。



工业射线探伤辐射安全与防护

3.8 工业射线探伤工作人员及公众的辐射安全与防护

探伤工作人员的安全与防护要求

- ①探伤作业时，至少有2名操作人员同时在场，每名操作人员应配备一台个人剂量报警仪和个人剂量计。
- ②现场探伤时，操作者须配备报警仪或适用的移动式防护设施。
- ③个人剂量计应定期送交有资质的检测部门进行测量，外照射个人剂量监测周期一般为30天，最长不应超过90天，并建立个人剂量档案。



工业射线探伤辐射安全与防护

探伤工作人员及公众的剂量限值

职业照射剂量限值

任何工作人员的职业照射水平不得超过下述限值：

- a、由审管部门决定的连续5年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv；
- b、任何一年中的有效剂量，50mSv；
- c、眼晶体的年当量剂量，150mSv；
- d、四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量，500mSv。



工业射线探伤辐射安全与防护

- 对于年龄为16岁~18岁在学习过程中需要使用放射源的学生，不得超过下述限值：
 - a、年有效剂量，6mSv；
 - b、眼晶体的年当量剂量，50mSv；
 - c、四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量，150mSv。



工业射线探伤辐射安全与防护

公众照射剂量限值

公众所受到的平均剂量估计值不应超过下述**限值**：

- a、年有效剂量， 1mSv ；
- b、特殊情况下，如果5个连续年的年平均剂量不超过 1mSv ，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv ；
- c、眼晶体的年当量剂量， 15mSv ；
- d、皮肤的年当量剂量， 50mSv 。



工业射线探伤辐射安全与防护

3.9 工业射线探伤的辐射监测

工业射线探伤的辐射监测

1、作业场所辐射监测

2、个人剂量监测

3、探伤机的防护性能监测



工业射线探伤辐射安全与防护

- 防护监测仪器



SV-7型数字式个人剂量仪



SYJ-9311型射线警报器



典型工作场所巡测仪



热释光个人剂量计



工业射线探伤辐射安全与防护

仪器使用

辐射测量仪器必须：

- 适用于应用辐射的类型和辐射能量的变动范围；
- 耐恶劣天气；
- 防震；
- 在光线暗的环境下有照明装置；
- 定期（或按规定）由管理当局认可的机构校准；
- 读数范围能满足 $20 \mu\text{Sv/h}$ 至 10 mSv/h .



工业射线探伤辐射安全与防护

作业场所的防护监测

固定式探伤作业场所的防护监测

- ①周围辐射水平巡测（发现辐射水平高的区域）
- ②定点监测（15个点）
- ③监测周期（最长1年）
- ④结果评价
 - a、X射线探伤室屏蔽墙外30cm处空气比释动能率不大于 $2.5 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。
 - b、 γ 射线探伤室防护墙及防护门外5cm处的剂量率应小于 $2.5 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$



工业射线探伤辐射安全与防护

• 移动式探伤作业场所的放射防护监测

①分区（控制区和监督区）

②监测周期

- （新开展现场射线探伤的单位，每年抽检1次；
- 在居民区进行的现场探伤，发现个人剂量超过5mSv/3月）



工业射线探伤辐射安全与防护

探伤作业中的辐射监测

作业场所监测-安装





工业射线探伤辐射安全与防护

作业场所监测 - 开始照射

- 源从装置中移出时，工作人员要密切观察测量仪器；
- 源从屏蔽容器移出放至照射位置时，辐射水平应急剧增加然后减小（因为距离增加以及在照射位置使用准直器）。





工业射线探伤辐射安全与防护

测量方法



测量应:

- 在源容器表面进行，保证源得到适当屏蔽(特别注意源的前面或射线出口端);
- 如果使用X射线装置，确保X射线已关闭。



工业射线探伤辐射安全与防护

作业场所监测 - 结束照射

- 收回源时工作人员应密切观察测量仪器。
- 源靠近屏蔽容器时辐射水平应迅速增加，一旦源收入容器中辐射水平迅速降到本底值。





工业射线探伤辐射安全与防护

作业场所监测 - 结束照射

工作人员应当：

- 认识到如果辐射剂量率没有降到本底水平，就可能存在问题；
- 确定辐射水平为什么没有减少。如源可能堵在准直器或导管；
- 如果源没有放回到屏蔽容器，声明是一起事故，并采取适当的措施，执行许可证持有者恢复源的应急程序。



我国工业探伤事故举例

2001年9月2日凌晨，某施工队在探伤检测后，将放射源（ ^{192}Ir ）从仪器中掉出，遗留在工地上。一工作人员在第二天上班时，发现放射源并拾起，双手来回玩耍、观看约20min，然后放入左裤兜；2小时后放入工具箱内，并在工具箱边吃饭、休息，下午下班洗澡时，发现右大腿有2x2cm的充血性红斑，当晚入院治疗



受照剂量:

全身剂量: 1.0Gy \pm 0.5

局部剂量: 右大腿皮肤 100Gy

右大腿骨中心 8Gy

左大腿 10~15Gy

手部 10~20Gy

胸部 10~15Gy





+4d



+5d





+9d









+27d

+27d







+15d



+22d

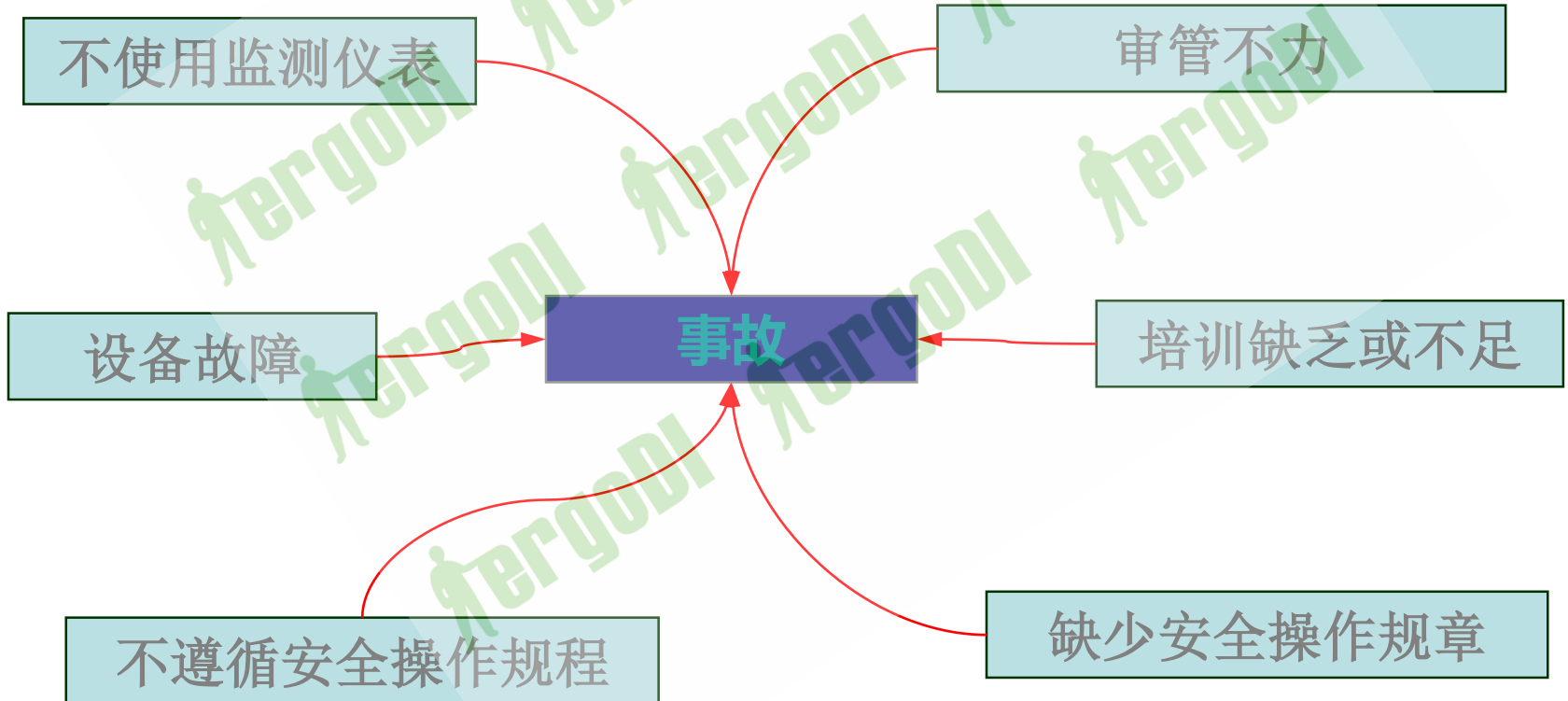


事故后果

- 严重的确定性效应
 - 死亡，失去肢体，红斑红疹
- 增加随机性的危险
 - 致死亡性癌症
- 环境污染
- 社会及经济后果



事故原因





谢谢，祝工作愉快！